

[Escribir texto]

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**“MODIFICACIÓN SUPERFICIAL DE ALEACIONES DE ALUMINIO MEDIANTE
IMPACTO CÍCLICO PARA LA MODIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS Y TRIBOLÓGICAS”.**

POR

ING. DIEGO ARMANDO GONZÁLEZ MEDINA

TESIS

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON
ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

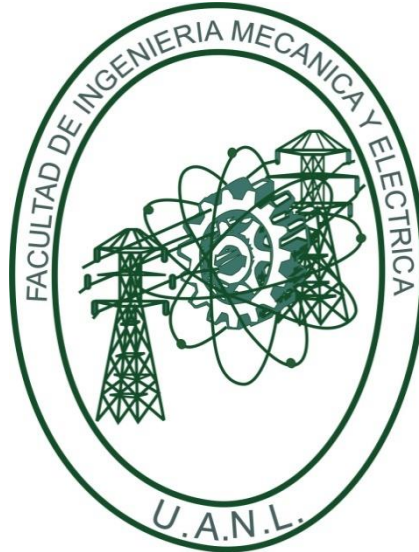
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN JUNIO DEL 2014.

[Escribir texto]

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**“MODIFICACIÓN SUPERFICIAL DE ALEACIONES DE ALUMINIO MEDIANTE
IMPACTO CÍCLICO PARA LA MODIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS Y TRIBOLÓGICAS”.**

POR

ING. DIEGO ARMANDO GONZÁLEZ MEDINA

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON
ESPECIALIDAD EN MATERIALES

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN JUNIO DEL 2014.

[Escribir texto]

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis, recomendamos que la tesis **“Modificación superficial de aleaciones de aluminio mediante impacto cíclico para la modificación de las propiedades mecánicas y tribológicas”**. Realizada por el Ing. Diego Armando González Medina sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería con Especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis

Asesor

Dr. Edgar Omar García Sánchez

Coasesor

Dr. Marco Antonio L. Hernández
Rodríguez

Coasesor

Dr. Rogelio Deaquino Lara

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Junio del 2014.

DEDICATORIA

A ***Dios***

Que con su bendición me permitió concluir este proyecto

A mi ***Madre***

“todo” es para Ti

A mi ***Familia***

Por motivarme a lograr mis sueños

A ***Verónica Reyes***

Gracias por hacer de mí, mi mejor versión

Con todo mi cariño este proyecto se los dedico a ustedes

AGRADECIMIENTOS

A todas y cada una de las personas que sin importar lugar, espacio, ni tiempo, dieron lo mejor para mí.

A ***Marcos Torres, Nelly Flores*** por la gran amistad durante este tiempo.

A ***Pedro Loera*** por su apoyo incondicional durante el inicio del proyecto.

A ***Gilberto Salazar*** por todas sus palabras.

A la invaluable labor de mi asesor ***Dr. Edgar García*** gracias por depositar en mi toda su confianza, su esfuerzo y trabajo, fuerte abrazo de gratitud.

Dr. Marco Hernández por su asesoría y enseñanza.

A la ***UANL*** en especial a la ***FIME***, la institución que me ha visto forjarme como profesionista.

Al ***CONACYT*** por darme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado y apoyarme económicamente en esta etapa de mi vida.

Dedico de corazón toda mi entrega en este gran trabajo, a ustedes siempre mi gratitud eterna.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
TABLA DE CONTENIDO	VI
RESUMEN	IX
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO	3
OBJETIVOS PARTICULARES:	3
HIPÓTESIS	4
CAPÍTULO I	5
EL ALUMINIO	5
1.1 PROPIEDADES GENERALES DEL ALUMINIO Y SU PRODUCCIÓN	5
1.1.2 PROPIEDADES INGENIERILES DEL ALUMINIO	5
1.1.3 PRODUCCIÓN DEL ALUMINIO	6
1.2 ALEACIONES DE ALUMINIO	7
1.2.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES TRABAJADAS	7
ALEACIONES DE LA SERIE 6XXX	9
ALEACIONES DE LA SERIE 5XXX	11
1.3 TRATAMIENTO ALEACIONES DE ALUMINIO	12
1.3.1 ALEACIONES DE ALUMINIO TRATADAS TÉRMICAMENTE.	13
1.3.2 ALEACIONES DE ALUMINIO NO-TRATADAS TÉRMICAMENTE.	14
1.4 PROCESO CONVENCIONAL DE EXTRUSIÓN EN ALEACIONES DE ALUMINIO DE LA SERIE 6XXX	18
1.5 INGENIERÍA DE SUPERFICIE	20
1.5.1 MODIFICACIÓN DE LA SUPERFICIE SIN CAMBIAR EL MATERIAL QUÍMICAMENTE	20
1.5.2 PROCESOS DE DEFORMACIÓN DE LA SUPERFICIE	21

1.5.3 PROCESO DE HAMMERING	23
----------------------------	----

CAPÍTULO LL	25
--------------------	-----------

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	25
-----------------------------------	-----------

2.1 INTRODUCCIÓN	25
2.2 DISEÑO, FABRICACIÓN Y CONDICIONES DE MATERIAL DE INICIO.	26
2.2.1 DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL SISTEMA HAMMERING	26
2.2.2 CONDICIONES DE LOS MATERIALES DE INICIO	31
2.3 DIAGRAMA DE EXPERIMENTACIÓN DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO	33
2.4 SECUENCIA DEL PROCESO DE HAMMERING	34
2.4.1 SECUENCIA DEL PROCESO PARA ALEACIÓN 6XXX	34
2.4.2 SECUENCIA DEL PROCESO PARA ALEACIÓN 5XXX	35
2.5 PROCESAMIENTO POR HAMMERING	37
2.5.1 PROBETA ALEACIÓN 6XXX	39
2.5.2 PROBETA ALEACIÓN 5XXX	41
2.6 PREPARACIÓN DE MUESTRAS PROCESADAS POR HAMMERING	43
2.7 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA	45
2.7.1 MICRODUREZA	45
2.7.2 PRUEBAS DE DESGASTE	49
2.8 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL	55
2.8.1 PREPARACIÓN PARA MICROSCOPIA ÓPTICA	55

CAPÍTULO LLL	57
---------------------	-----------

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
---	-----------

3.1 INTRODUCCIÓN	57
3.2 MICRODUREZA	57
3.2.1 ALEACIÓN DE ALUMINIO DE REFERENCIA	57
3.2.2 ALEACIÓN DE ALUMINIO 6060-T6	58
3.2.3 ALEACIÓN DE ALUMINIO 5083-H116	59
3.3 MAPAS DE MICRODUREZA	60
3.3.1 MAPEO ALEACIÓN DE ALUMINIO 6060-T6	61
3.3.2 MAPEO ALEACIÓN DE ALUMINIO 5083-H116	65
3.4 MICROSCOPIA ÓPTICA	71
3.4.1 AL6060 DE REFERENCIA	71
3.4.2 AL5083 DE REFERENCIA	73

3.4.3 AL 6060 POR TÉCNICA DE HAMMERING	74
3.4.5 AL 5083 POR TÉCNICA DE HAMMERING	76
3.5 EVOLUCIÓN MICROESTRUCTURAL	78
3.6 ZONA DE ALTA DEFORMACIÓN PLÁSTICA	79
3.7 DESGASTE	80
3.8 MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM), ANÁLISIS DE DESGASTE	85
3.8.1 MECANISMOS DE DESGASTE	86
AL6060, AL5083 DE REFERENCIA	86
AL6060, AL5083 PROCESADAS POR HAMMERING	88
CAPÍTULO IV	91
CONCLUSIONES	91
CAPÍTULO V	93
RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	VIII
ANEXOS	XII
ANEXO 1 MUESTRA AL5083 GOLPE ESTACIONARIO	XII
ANEXO 2 MUESTRA AL6060 ENVEJECIDO	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABLAS	XVII
ÍNDICE	XVIII

RESUMEN

La presente investigación surge con el objetivo de desarrollar un nuevo proceso de modificación superficial mediante golpes cíclicos nombrado “Hammering” el cual se pretende pueda generar superficies de granos ultrafinos además de impartir esfuerzos residuales compresivos. Tomando en cuenta los importantes resultados que se pueden obtener se estudiaron dos aleaciones de aluminio; serie 5xxx y 6xxx. Este proceso se aplicó en las dos aleaciones de aluminio con el fin de mejorar todas las propiedades de la superficie. Este estudio se enfoca en estudiar diferentes características de estos materiales tales como:

- Microestructura.
- Propiedades mecánicas.
- Características tribológicas

Comparado con la muestras de referencia, la superficie ultrafina inducida por proceso de hammering fue caracterizada por microscopía óptica, microdureza y desgaste analizado por SEM. El aumento de las propiedades mecánicas también fue demostrado. Se analizan los resultados de la microestructura y la microdureza de la capa formada así como también las características experimentales.

Parte importante del sistema es la punta del rotomartillo, esta tiene una forma semiesférica que es impactada a altas velocidades de manera controlada en la superficie de las muestras de aluminio, estas se encuentran montadas en un sistema que se mueven con los ejes controlados. Las propiedades mecánicas de la capa superficial endurecida se investigaron mediante un microindentador. El refinamiento de grano en las superficies de aluminio de proceso de hammering resultó por la formación de alta densidad de dislocaciones y la subdivisión de los granos originales en subgranos, fortaleciendo considerablemente la superficie. Endurecimiento por precipitación y endurecimiento por trabajo se estudiaron en este método.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de propiedades mecánicas en materiales endurecidos por la técnica Hammering y la determinación de los mecanismos de deformación en estos materiales es un campo relativamente nuevo de conocimiento que ha sido de gran interés para la comunidad científica.

En muchos casos, la falla de una pieza de trabajo puede iniciar en la superficie, como la fractura por fatiga, fatiga por fretting, desgaste y la corrosión. Por lo tanto, la modificación de la microestructura superficial y las propiedades de los materiales de ingeniería de superficies, puede desempeñar un papel importante en el control del inicio de una falla [1].

Una de las formas prometedoras y de gran interés para el procesamiento de materiales con tamaño de grano ultrafino (UFG) es la deformación plástica severa (SPD del acrónimo en inglés Severe Plastic Deformation) bajo esta técnica se han realizado este tipo de materiales [2-3].

El mecanismo de formación de estas microestructuras se basa principalmente en la descomposición de los granos por la acumulación de dislocaciones y por una severa deformación plástica asociada con la formación de celdas de dislocación de alta densidad [4].

Materiales en masa de grano ultrafino (UFG) son aquellos materiales que tienen microestructuras equiaxiales y homogéneas con un tamaño de grano promedio menor a 1 μm , con textura de ángulo elevado en la mayoría de los límites de grano. Se requiere un alto nivel de deformación para introducir una gran densidad de defectos en la red, necesario para el refinamiento de la microestructura [5].

Sin embargo, la producción del grano ultra-refinado o escala nanométrica mediante SPD tiene desventajas de requerir gran cantidad de energía de trabajo plástico, uso de equipos o instalaciones especiales.

En comparación con SPD el endurecimiento superficial inducido por hammering se puede lograr mucho más fácilmente. Además de su simple y bajo costo de operación, combina las propiedades superiores de materiales de grano ultrafino con materiales de ingeniería convencionales [6].

OBJETIVO

Es posible y factible diseñar y construir un dispositivo de “Hammering” que permita obtener resultados confiables para formar una capa superficial endurecida, con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de la superficie.

Objetivos Particulares:

- Diseñar y construir un dispositivo de “Hammering” para el estudio de modificación superficial de materiales.
- Establecer procedimientos de análisis para la evaluación y control de las propiedades de los materiales y las variables de procesamiento.

HIPÓTESIS

Es posible modificar considerablemente las propiedades superficiales y generar una capa con granos de tamaño ultrafino mediante endurecimiento superficial “Hammering” basado en deformación cíclica, promoviendo alta densidad de dislocaciones y subdivisión de los granos, además de inducir esfuerzos residuales compresivos, mejorando el rendimiento de la superficie.

CAPÍTULO I

El Aluminio

1.1 Propiedades generales del aluminio y su producción

1.1.2 Propiedades ingenieriles del aluminio

El aluminio tiene una combinación de propiedades que lo hacen sumamente útil como material de ingeniería. El aluminio tiene una densidad baja (2.70 g/cm^3), que lo hace particularmente útil para productos estructurales, por ejemplo, para el transporte. El aluminio tiene también buena resistencia a la corrosión en la mayoría de los ambientes naturales, debido a la película de óxido que se forma en su superficie. Aunque el aluminio puro tiene baja resistencia, mediante sus aleaciones puede adquirir una resistencia aproximada de 100 ksi (690 MPa). El aluminio no es tóxico y se usa ampliamente en recipientes y envases para alimentos. Las buenas propiedades eléctricas del aluminio lo hacen adecuado para muchas aplicaciones en la industria eléctrica [7]. Se puede reciclar mediante sólo el 5 % de la energía que fue necesaria para su fabricación a partir de la alúmina, debido a su bajo punto de fusión, el aluminio presenta limitantes a altas temperaturas [8].

1.1.3 Producción del aluminio

El aluminio es el elemento metálico más abundante en la superficie de la Tierra y siempre se presenta combinado con otros elementos, como hierro, oxígeno y silicio. La bauxita, formada principalmente por óxidos de aluminio hidratados es el mineral comercial más importante que se usa para producir aluminio. En el proceso Bayer, la bauxita reacciona con hidróxido de sodio caliente para convertir el aluminio del mineral de hierro en aluminato de sodio. Después de la separación del material insoluble, el hidróxido de aluminio se precipita a partir de la solución de aluminato. En la solución de hidróxido de aluminio se deja espesar y se calcina para obtener óxido de aluminio, Al_2O_3

El óxido de aluminio se disuelve en un baño de criolita (Na_3AlF_6) fundida y se electroliza en una cuba electrolítica (figura 1) utilizando ánodo y cátodo de carbono. En el proceso de electrólisis se forma aluminio metálico en estado líquido, el cual se hunde en el fondo de la cuba y periódicamente se vacía. El aluminio extraído de la cuba suele contener de 99.5 a 99.9 por ciento de aluminio; el hierro y el silicio son las principales impurezas.

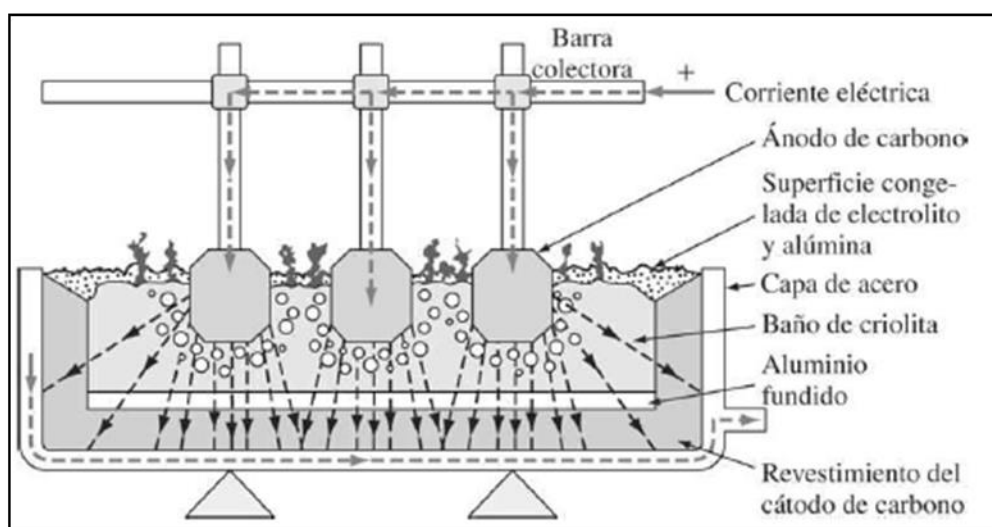


Figura 1 Tanque Cuba electrolítica utilizada en la producción del aluminio.

1.2 Aleaciones de Aluminio

La clasificación de las aleaciones de aluminio ha cambiado mucho a través del tiempo y de los países, esto dificultó mucho su estandarización. Varias sociedades dedicadas a la investigación y la ingeniería han establecido procedimientos para clasificarlas. Entre las instituciones más importantes se pueden mencionar, la *International Alloy Designation System* (AIDS), la *American National Standards Institute* (ANSI), estas dos basadas en la *Aluminum Association of the United States*. En este trabajo se hablara sobre la clasificación de las aleaciones basados en la ANSI, que es una de las instituciones más reconocidas internacionalmente [9].

Existen dos grupos en que se clasifican los productos obtenidos de aluminio. Estos son: directamente vaciados (*cast aluminum alloys*) o vaciados en lingotes (*foundry ingots aluminum alloys*) y los trabajados (*wrought aluminum alloys*), de estos más del 85% son trabajados. Ambos grupos están registrados por la *Aluminum Association* dentro del estándar ANSI H35, en la designación y composición de aleaciones de aluminio y su tratamiento registradas en los Estados Unidos [9].

1.2.1 Clasificación de las aleaciones trabajadas

La ANSI asigna a cada aleación trabajada un numero de cuatro dígitos de los cuales, el primero se refiere al principal elemento de aleación. Existen los siguientes grupos de aleaciones: serie 1xxx aluminio sin alear (con un 99% mínimo de pureza), serie 2xxx con cobre como elemento principal de aleación, serie 3xxx con manganeso, serie 4xxx con silicio, serie 5xxx con magnesio, serie 6xxx con magnesio-silicio, serie 7xxx con zinc y en algunos casos magnesio, serie 8xxx para otros elementos (litio) y serie 9xxx para aleaciones inusuales (figura 2).

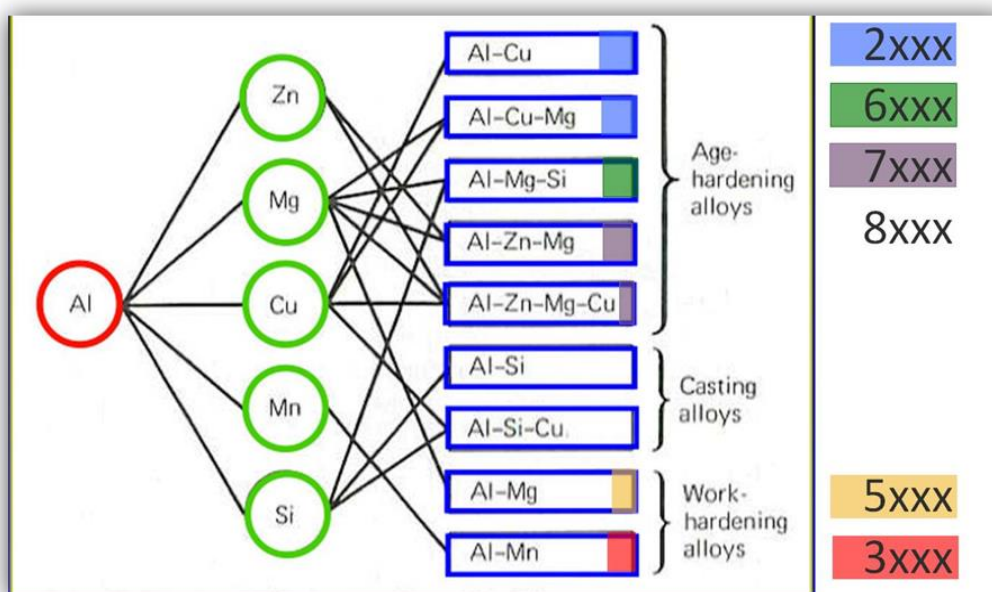


Figura 2 Constitución de las aleaciones de aluminio [10]

El tercer y cuarto dígito son significativos en la serie 1xxx, pero no en otras aleaciones. En las aleaciones 1xxx, la pureza mínima del aluminio se muestra por esos dígitos, por ejemplo la 1150 significa una pureza del aluminio del 99.50%, en 1300, significa una pureza del aluminio del 99.00%. En las series del 2xxx al 8xxx, el tercer y cuarto dígito tienen un significado pequeño, no representa otra cosa que el número consecutivo de la aleación, por ejemplo las aleaciones 3003, 3004, 3005, son completamente diferentes, así mismo las aleaciones 6061, 6063, son diferentes. El segundo dígito en la designación indica modificación a la aleación, si es cero significa que es una aleación original, si es entre 1 y el 9 indica modificaciones menores a la primera, por ejemplo las aleaciones 5083 y 5453 varían muy poco en su composición.

Los elementos de aleación primaria y las propiedades de las aleaciones resultantes son listados y resumidos en la tabla 1.

Tabla 1 Aleaciones trabajadas sistema de designación y características [11].

Series Number	Primary Alloying Element	Relative Corrosion Resistance	Relative Strength	Heat Treatment
1xxx	none	excellent	fair	non-heat-treatable
2xxx	copper	fair	excellent	heat-treatable
3xxx	manganese	good	fair	non-heat treatable
4xxx	silicon	—	—	varies by alloy
5xxx	magnesium	good	good	non-heat-treatable
6xxx	magnesium and silicon	good	good	heat-treatable
7xxx	zinc	fair	excellent	heat-treatable

Aleaciones de la serie 6xxx

Las aleaciones de serie 6xxx, son un grupo que contiene magnesio y silicio en proporción que forma (Mg_2Si). Estas aleaciones tienen buen balance en resistencia a la corrosión y resistencia mecánica. La aleación 6061 es una de las más populares de todas las aleaciones de aluminio y tiene una resistencia a la cendencia comparable con la de un acero al carbono. Las aleaciones de la serie 6xxx son fácilmente extruidas, constituyen la mayor producción de aleaciones extruidas y son usadas extensivamente en edificaciones, construcción y muchas otras aplicaciones estructurales [12].

Las figuras 3 y 4 muestran algunos ejemplos de aplicaciones de aleaciones base aluminio.



Figura 3 Estructura de aluminio extruido, soportando paredes de vidrio [12].



Figura 4 Distintos dispositivos estructurales de aluminio: (a) Escalera, (b) Mosquetón, (c) Rin, (d) Artículo deportivo [12].

Aleaciones de la serie 5xxx

Las aleaciones de la serie 5xxx se producen mediante la adición de magnesio, dando como resultado, aleaciones fuertes y resistentes a la corrosión, presentando alta resistencia y soldabilidad. Tienen muy buena conformabilidad en frío. Las aleaciones de este grupo se utilizan en los cascos de buques (figura 5) y otras aplicaciones marinas. La resistencia de las aleaciones de esta serie es directamente proporcional al contenido de magnesio, que se extiende hasta aproximadamente 6%. [12].



Figura 5 Aplicación marina de aleaciones de aluminio serie 5xxx.

1.3 Tratamiento aleaciones de aluminio

La resistencia de aleaciones de aluminio trabajado se puede mejorar de dos maneras diferentes [11]:

- **Deformación en frío:** Durante la deformación en frío, defectos cristalinos se generan, mejorando las propiedades de resistencia.
- **Aleación:** Elementos de aleación se añaden normalmente al aluminio para aumentar la resistencia.

Aleaciones de aluminio trabajado que obtienen su resistencia a través de una combinación de la precipitación y deformación se llaman “**Tratable-Térmicamente**”. Las otras aleaciones obtienen su resistencia a través de la deformación en frío se clasifican como “**No-Tratables Térmicamente**” o también como *aleaciones endurecidas por trabajo*. Los diferentes tratamientos para estas aleaciones se indican con un código específico después de la designación de la aleación AA (tabla 2). No tratables térmicamente también pueden someterse a tratamiento térmico, pero este tratamiento es usado solo para estabilizar propiedades de modo que la resistencia no cambia significativamente con el tiempo (este comportamiento es llamado age softening) y se requiere sólo para aleaciones con una cantidad apreciable de magnesio (la serie 5xxx). En general se designa a las aleaciones tratables térmicamente como (T-Tempers) y aleaciones endurecidas por trabajo como (H-Tempers) [11].

Tabla 2 Designaciones de tratamiento para aleaciones de aluminio [11].

Temper	Description
F	As-fabricated
O	Annealed or recrystallized
H	Work hardened; The H is followed by 2 digits
W	Solution heat treated
T	Thermally treated; The T is always followed by 1 or more digits

1.3.1 Aleaciones de aluminio tratadas térmicamente.

Las aleaciones de aluminio tratadas térmicamente son reforzadas por precipitación y ofrecen un tratamiento térmico especial (T-Tempers) (tabla 3) [13]. Las aleaciones en las cuales la cantidad de elementos aleantes en solución sólida en aluminio incrementa con la temperatura son tratables térmicamente. Estas aleaciones incluyen la serie 2xxx (Al-Cu y Al-Cu-Mg), la serie 6xxx (Al-Mg-Si), la serie 7xxx (Al-Zn-Mg y Al-Zn-Mg-Cu) y las aleaciones de aluminio-litio de la serie 8xxx [14].

Tabla 3 Designaciones de tratamiento para aleaciones de aluminio tratables térmicamente [11].

O	Annealed.
F	As fabricated.
W	Solution heat treatment: spontaneous natural aging after solution treatment
T1	Cooled after high-temperature processing and naturally aged to substantially stable condition.
T2	Cooled after high-temperature processing, cold worked and naturally aged to substantially stable condition.
T3	Solution heat-treated, cold worked and naturally aged to substantially stable condition.
T4	Solution heat treated and naturally aged to a substantially stable condition.
T5	Cooled after high-temperature processing and artificially aged.
T6	Solution heat-treated and artificially aged, usually to the maximum strength.
T7	Solution heat-treated and stabilized or overaged.
T8	Solution heat-treated, cold worked and artificially aged.
T9	Solution heat-treated, artificially aged and cold worked.
T10	Cooled after high-temperature processing, cold worked and artificially aged.

1.3.2 Aleaciones de aluminio No-tratadas térmicamente.

Estas aleaciones no pueden ser endurecidas por tratamiento térmico y por lo tanto se endurecen por una combinación de reforzamiento por solución sólida y trabajo en frío [13]. Aleaciones trabajadas pueden ser reforzadas por endurecimiento por trabajo (H-Tempers) (tabla 4) [7]. Las aleaciones forjadas no tratables térmicamente incluyen la serie de aluminio puro comercial (1xxx), la serie de aluminio-manganeso (3xxx), la serie de aluminio-silicio (4xxx), y la serie de aluminio-magnesio (5xxx) [14].

Tabla 4 Designaciones de tratamiento para aleaciones endurecidas por deformación [11].

F	As-fabricated. No control over the amount of strain hardening; no mechanical property limits.
O	Annealed, recrystallized. Temper with the lowest strength and greatest ductility.
H1	Strain hardened.
H2	Strain hardened and partially annealed.
H3	Strain hardened and stabilized.
H112	Strain hardened during fabrication. No special control over amount of strain hardening, but requires mechanical testing and meets minimum mechanical properties.
H321	Strain hardened during fabrication. Amount of strain hardening controlled during hot and cold working.
H116	Special strain hardened, corrosion resistant temper for aluminum magnesium alloys.

En general, la resistencia de las aleaciones de aluminio se puede aumentar por varios métodos [11]:

Endurecimiento por solución sólida: Elementos de aleación se disuelven completamente en la matriz de aluminio para formar una solución sólida. Implica un aumento de la resistencia a la tensión y límite de fluencia producida por elementos de aleación en solución sólida. Los elementos en solución producen distorsiones elásticas (distorsión local en la red) en la retícula principal actuando de este modo como una barrera a los movimientos de dislocación. Aunque la mayoría de los elementos pueden formar aleación con aluminio, comparativamente pocos elementos tienen suficiente solubilidad sólida para dar un efecto de endurecimiento por solución sólida sustancial [11].

El Mg muestra el efecto dominante más efectivo en el fortalecimiento por soluto en aleaciones de aluminio. La resistencia a la cadencia y la resistencia a la tensión incrementan con el aumento del nivel de Mg mientras que la elongación cae con las pequeñas adiciones de Mg. El efecto del Mg en solución sólida en aleaciones no tratables térmicamente se observa en la figura 6 [11].

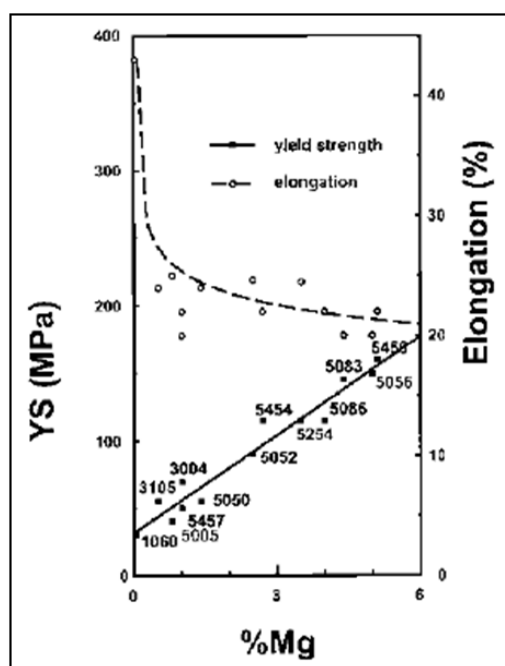


Figura 6 Efecto del Mg en las propiedades tensiles de una aleación de aluminio comercial no tratable térmicamente [11].

Endurecimiento por dispersión: Los elementos de aleación forman una dispersión insoluble muy fina de fases intermetálicas. Elementos de transición por lo general se agregan para lograr este efecto [12]. En el mecanismo de endurecimiento por dispersión las partículas duras (partículas de segunda fase; óxidos, carburos, nitruros, boruros, etc.) se mezclan con polvos metálicos y se consolidan por técnicas de metalurgia en polvo [15].

El endurecimiento por precipitación: Elementos de aleación se ponen en solución sólida a altas temperaturas y se realiza un enfriamiento rápido a temperatura ambiente. A temperaturas intermedias por debajo de 200°C se precipitan partículas muy finas a partir de la solución sólida súper saturada (SSSS) que resulta en un aumento sustancial en la resistencia. El tratamiento térmico aplicado también se llama envejecimiento. Aluminio-Cobre es el ejemplo clásico de endurecimiento por precipitación (figura 7) [11].

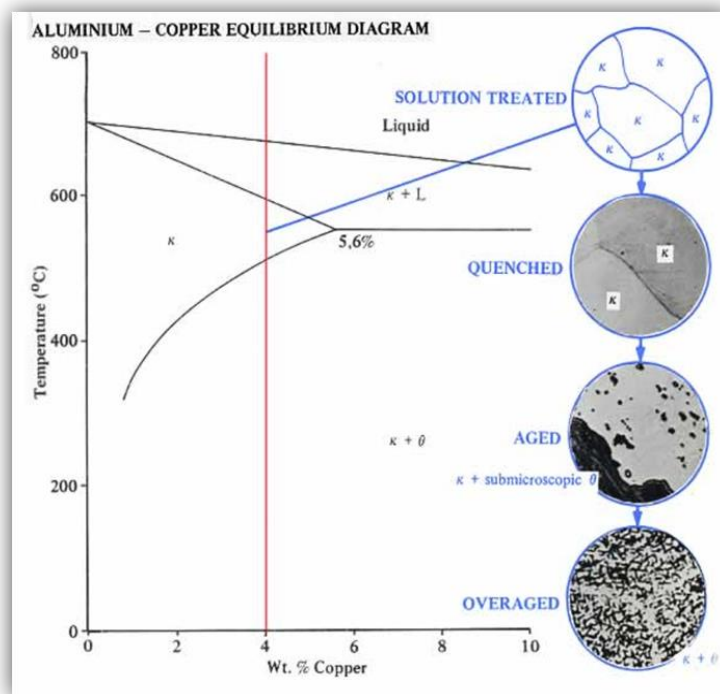


Figura 7 Principio de endurecimiento por precipitación en aleaciones de aluminio [11].

El tamaño de los precipitados está en función de la temperatura y el tiempo de exposición, a una mayor temperatura o tiempo el tamaño de los precipitados crece, lo cual es indeseable.

Los precipitados que endurecen al material se pueden obtener a temperatura ambiente o elevada. Cuando el endurecimiento se lleva a cabo a temperatura ambiente se le llama envejecido natural, cuando se lleva a temperatura elevada se le llama envejecido artificial o endurecimiento por precipitación (precipitation hardening). A temperatura ambiente el tratamiento de precipitación se lleva a cabo a tiempos muy largos, en cambio a temperaturas entre 115 y 190 °C, el tiempo varía entre 5 y 48 horas. Las diferencias en tipo, fracción volumétrica, tamaño y distribución de las partículas precipitadas gobiernan las propiedades y estas partículas están en función del tiempo y la temperatura.

Endurecimiento por trabajo: Propiedades de los metales cambian por trabajo en frío. Para la mayoría de los metales resistencia a la tensión, resistencia a la fluencia y dureza incrementan a expensas de ductilidad y conformabilidad. Endurecimiento por trabajo se utiliza ampliamente para fortalecer aleaciones no tratables térmicamente [11].

El efecto del endurecimiento por trabajo es claramente mostrado en la tabla 5, se puede observar un fuerte aumento en las propiedades mecánicas con el incremento de la cantidad de trabajo en frío mientras que la elongación decrece significativamente [11].

Tabla 5 Propiedades tensiles de una placa de aluminio [11].

Alloy-Temper	UTS (MPa)	YS (MPa)	Elongation (%)
1100-O	75	25	30
1100-H14	110	95	5
1100-H18	150	—	4
5052-O	170	65	19
5052-H34	235	180	6
5052-H38	270	220	4

1.4 Proceso convencional de extrusión en aleaciones de aluminio de la serie 6xxx

La figura 8 muestra las etapas del proceso para la producción de perfiles extruidos de aluminio, como vigas y tubos. El esquema muestra que después de la colada la aleación de aluminio es homogenizada. Durante este proceso de homogenización los perfiles de aluminio son introducidos en un horno por unas pocas horas a temperatura entre 530 y 600°C. Subsecuentemente los perfiles son enfriados y transportados al proceso de extrusión; los perfiles son recalentados y extruidos. Durante este proceso los perfiles de aluminio son prensados a través de un dado con forma abierta, ver figura 9. Como paso final (opcional), los perfiles extruidos son artificialmente endurecidos por envejecido. Entre estas etapas de procesamiento, la homogenización de los perfiles de aluminio Al-Mg-Si, es una de las más importantes, porque promueve cambios significativos en la microestructura de la aleación, conduciendo a una mejora en maquinabilidad del material y mejora en las propiedades finales del producto. Históricamente, el tratamiento térmico de homogenización se añadió muy reciente al ciclo del proceso. Esto fue introducido a la industria alrededor del año 1960 [16].

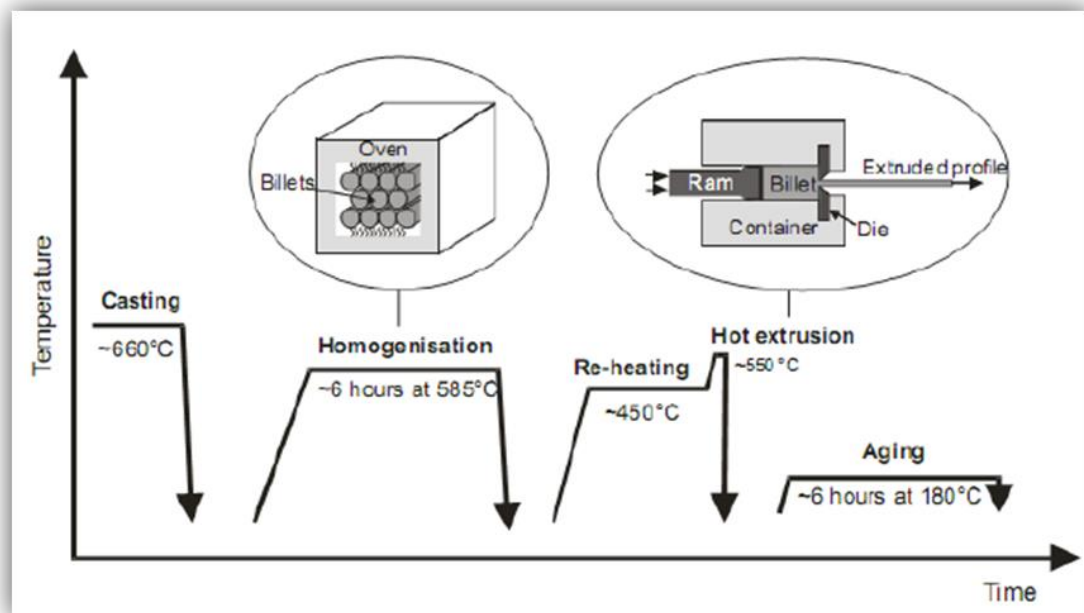


Figura 8 Ruta de temperatura esquemática del calentamiento de aluminio durante la producción de perfiles extruidos [16].

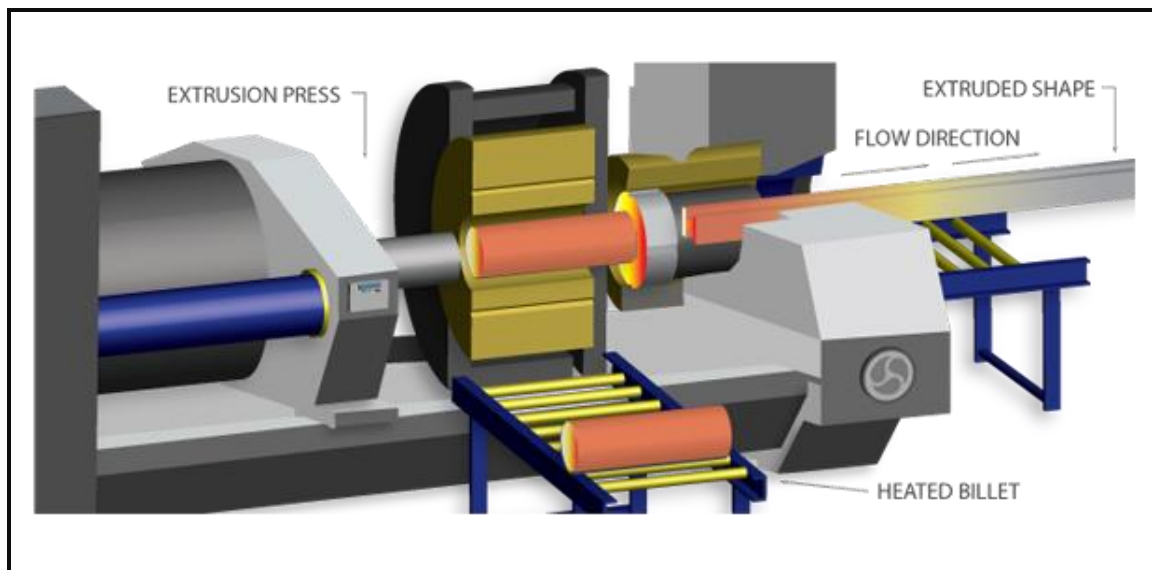


Figura 9 Proceso de extruido de aleaciones de aluminio [17].

1.5 Ingeniería de superficie

Ingeniería de superficies se refiere a una amplia gama de tecnologías diseñadas para modificar las propiedades superficiales de los componentes metálicos y en este trabajo está enfocado a la modificación superficial sin realizar cambios en la composición química de la misma [18].

- **Definición**

Para realizar cambios en la superficie de un material.

- **Propósito**

1. Para obtener o mejorar las propiedades de superficie de un material.
2. Para mejorar componentes, rendimiento, vida útil.

Existen muchos procedimientos de modificación de propiedades de la superficie, pero solo describiré el que está relacionado con este trabajo.

1.5.1 Modificación de la superficie sin cambiar el material químicamente

Se refiere a los cambios realizados por medios térmicos o mecánicos, alterando la metalurgia o la textura de la superficie.

- **Procesos Mecánicos**

Algunos materiales responden bien al trabajo en frío. Trabajar la superficie por granallado, limpieza abrasiva u otros procesos de mecanizado especializado inducen esfuerzos de compresivos, aumentando la dureza y la resistencia a la fatiga [19].

1.5.2 Procesos de deformación de la superficie

Procesos de deformación de la superficie tales como; *granallado*, *laminación profunda*, *ondas de choque generadas por láser*, *granallado por chorro de aceite* y *granallado ultrasónico*, se emplean para generar un campo de esfuerzo residual de compresión en los materiales metálicos que mejora el rendimiento de componentes sometidos a una carga cíclica. Estos procesos mejoran las propiedades de la superficie que se ven afectadas por fatiga, fretting, desgaste, corrosión y erosión los cuales son fallas que inician desde la superficie de los materiales. Diversas técnicas de deformación de superficie se han desarrollado para producir una estructura cristalina de grano fino con propiedades mecánicas mejoradas mediante la transformación de la estructura de grano grueso original en granos refinados mientras se mantiene la composición química global del material objetivo. [20].

Una aleación de aluminio 7075 con modificación superficial utilizando *granallado ultrasónico* mostro refinamiento del grano causado por la subdivisión grano en subgranos este fue el principal mecanismo de refinamiento de grano en esta aleación [21].

Granallado por chorro de aceite se realizó para impartir esfuerzos residuales compresivos en materiales metálicos lo cual resulta en un endurecimiento de superficie significativo asociado con el refinamiento de grano, con este método se logró la formación de tamaño de grano ultrafino (~ 210 nm) cerca de la superficie de aleaciones de aluminio con una capa de superficie fuertemente deformada. [22].

Se sabe que la iniciación y propagación de grietas por fatiga se puede prevenir o retrasar por la presencia de esfuerzos residuales de compresión. La estructura de grano fino con alta dureza producido por la deformación plástica severa de la superficie mejora el umbral de iniciación de la grieta por fatiga esto

porque las propiedades de fatiga de los materiales metálicos son altamente sensibles al tamaño de grano y los esfuerzos residuales [23].

La formación de estructura de grano fino en la capa superficial de los materiales metálicos involucra actividades de dislocaciones y desarrollo de los límites de grano. Las actividades de dislocaciones en los metales dependen fuertemente de la estructura cristalina y la energía de falla de apilamiento (SFE). Los dos factores que gobiernan el proceso de refinamiento de grano en los metales son [24]:

- Energía de falla de apilamiento (SFE)
- Número de sistemas de deslizamiento activos.

Tratamientos superficiales mecánicos tales como granallado y laminación profunda se realizan a menudo en aleaciones de aluminio de alta resistencia para mejorar el comportamiento a la fatiga [25-27]. Todos los tratamientos de superficie mecánicos conducen a una rugosidad característica de la superficie, en esta, se incrementó la densidad de dislocaciones (trabajo en frío) y el desarrollo de esfuerzos residuales macroscópicos (tabla 6). Una rugosidad de superficie alta acelera la nucleación grieta con ningún efecto sobre la propagación. El trabajo en frío retrasa la nucleación grieta pero acelera la propagación. Esfuerzos residuales de compresión tienen poco efecto sobre la nucleación grieta, pero pueden retardar drásticamente la propagación de grietas [28].

Tabla 6 Características de tratamientos de superficie mecánicos [29].

	Crack nucle- ation	Crack propagation
Surface roughness	Accelerates	No effect
Cold work	Retards	Accelerates
Residual compressive stress	Minor or no effect	Retards

1.5.3 Proceso de Hammering

Este proceso busca establecer un nuevo procedimiento de endurecimiento superficial, formando capas endurecidas de grano ultrafino con el fin de mejorar las propiedades de la superficie. La ilustración esquemática del proceso de hammering se muestra en la figura 10. La figura 11 muestra el esquema de la evolución microestructural a lo largo de la profundidad desde la superficie golpeada por la técnica hammering. El proceso produce una capa superficial estructurada de granos finos sobre la superficie superior. El refinamiento de granos policristalinos gruesos están constituidos por granos ultrafinos seguidos de una capa de grano deformado los cuales se observan por debajo de la superficie de la muestra procesada por la técnica hammering. Con este proceso se busca generar este perfil de deformación para mejorar las propiedades de la superficie.

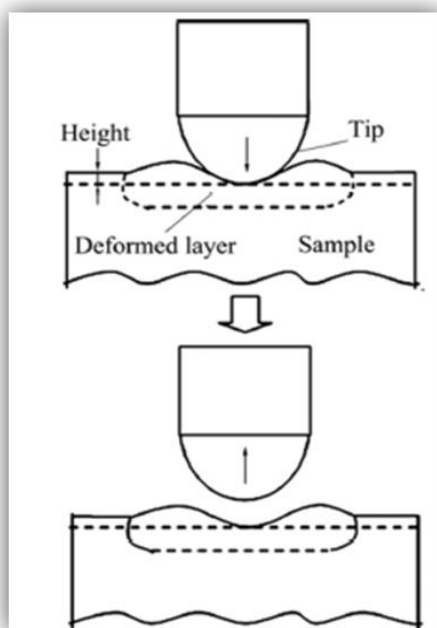


Figura 10 Ilustración esquemática del proceso de hammering [6]

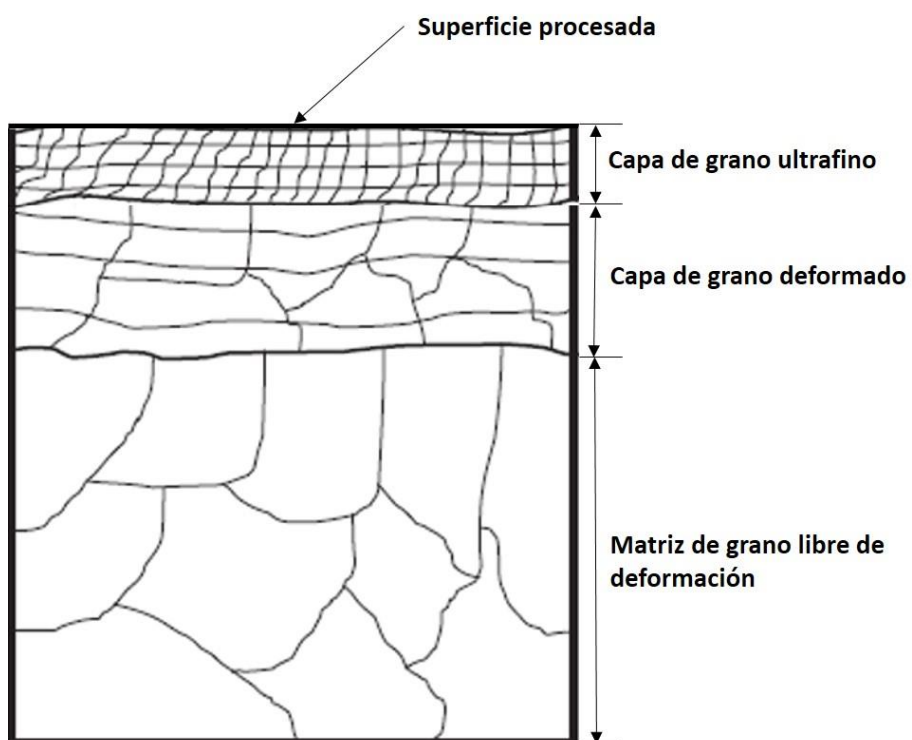


Figura 11 Ilustración esquemática de la evolución de la microestructura a lo largo de la profundidad de la capa de superficie endurecida [30].

CAPÍTULO II

Procedimiento Experimental

2.1 Introducción

En el presente capítulo se detallará el procedimiento experimental que se llevó a cabo, incluyendo el diseño del equipo “Hammering”, los parámetros utilizados, la preparación de las probetas para la modificación superficial, la caracterización mecánica, microscópica, en las aleaciones de aluminio Al6060 y Al5083.

El siguiente diagrama muestra el programa experimental general de este trabajo (figura 12). Se parte de dos aleaciones de aluminio (Al6060 y Al5083), las cuales son deformadas por las técnica hammering, posteriormente se realizaron ensayos de microdureza en secciones transversales, se caracterizó microestructuralmente y se realizaron pruebas de desgaste para observar el efecto de esta técnica de modificación superficial sobre su microestructura y propiedades mecánicas.

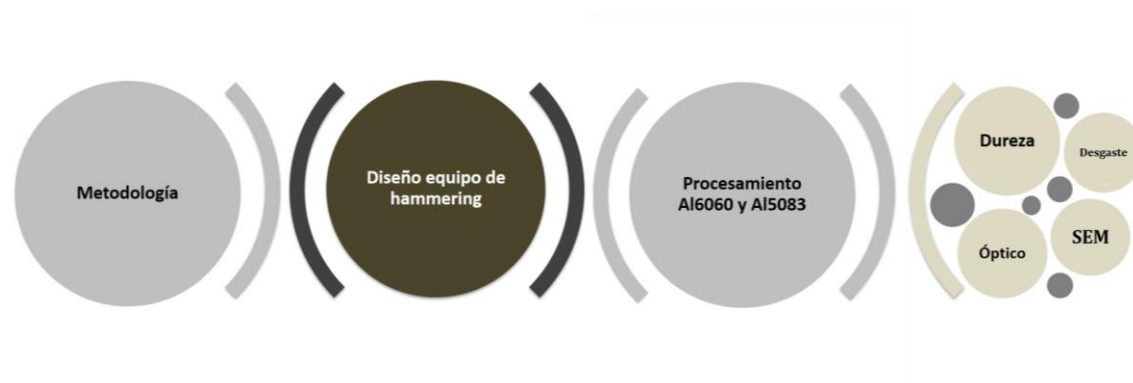


Figura 12 Diagrama experimental global

2.2 Diseño, fabricación y condiciones de material de inicio.

2.2.1 Diseño y fabricación del sistema Hammering

El equipo usado para realizar el proceso de hammering fue construido utilizando un roto-martillo marca Bosch modelo Bulldog Xtreme Max SDS, cuyas especificaciones técnicas más relevantes se muestran en la tabla 7.

Tabla 7 Especificaciones técnicas del roto-martillo Bosch Bulldog Xtreme [31].

Especificaciones	
Energía de impacto/EPTA* (ft-lb.)	2.4
BPM** sin carga	0 - 5,460

*European Power Tool Association

**Golpes Por Minuto

- El primer paso fue diseñar un soporte rígido vertical para montar el rotomartillo, de tal manera que tuviera movimiento vertical manual mediante una manivela (figura 13).



Figura 13 Roto-martillo montado en soporte vertical

- Después se colocó un tornillo de banco en la parte inferior de la base del roto-martillo para controlar los ejes “x” y “y”, (figura 14) de esta manera se tiene control del movimiento para cubrir el área donde va a impactar la punta del roto-martillo.

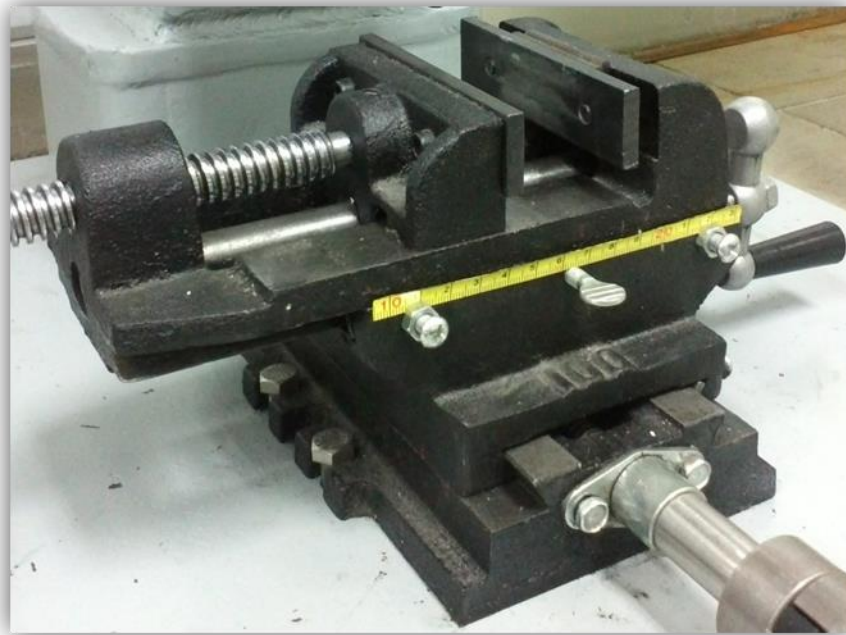


Figura 14 Tornillo de banco en la parte inferior del roto-martillo

- El tercer paso fue necesario realizar el maquinado de coples anti-desbalance, una flecha y opresores, todo lo anterior va montado en el eje “y” del tornillo de banco (figura 15)
- El cuarto paso fue adquirir un motor de CD que va colocado sobre el eje “y”. (fig.2.4) y la realización de tarjeta electrónica con relevadores para el control del motor de CD. (figura 16)

Las actividades anteriores se realizaron para automatizar el avance y regreso en el eje “y” del tornillo de banco, para mantener constante la velocidad de avance durante el proceso.



Figura 15 Coples y flecha del eje “y”



Figura 16 Motor CD colocado en eje “y” y Tarjeta electrónica

Se realizó el maquinado de la punta para impactar la superficie de las muestras (Fig. 17), esta se fabricó de forma semiesférica,



Figura 17 Punta de forma semiesférica para Hammering

También se diseñó y construyó un porta-muestras (figura 18) para sujetar las probetas en el sistema, este se coloca sobre el tornillo de banco. El tamaño de las probetas fue de:

- Sección transversal de 20 x 10 mm
- Longitud: 50 mm

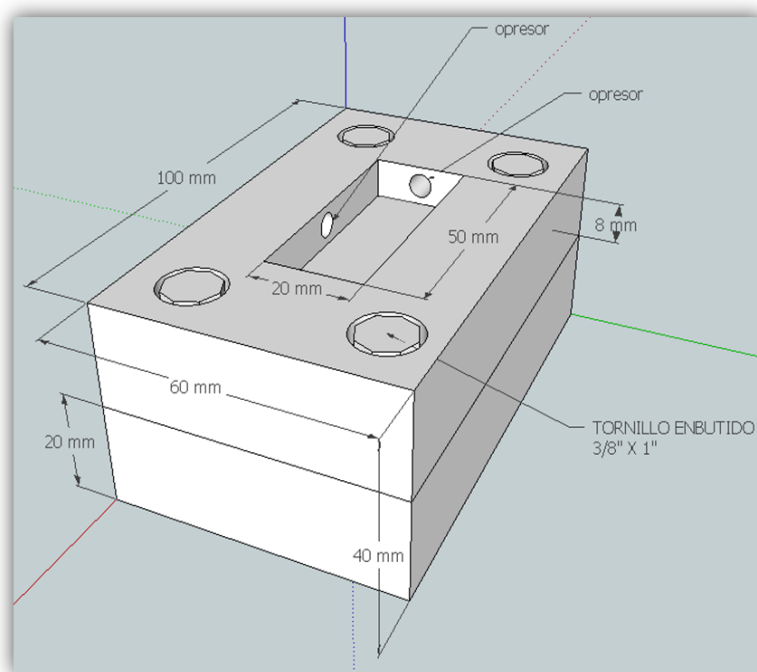


Figura 18 Porta-muestras para las probetas sometidas a Hammering

2.2.2 Condiciones de los materiales de inicio

Se estudiaron dos aleaciones de aluminio:

- Al-Mg-Si de la serie 6xxx, obtenida por un proceso convencional de extrusión.
- Al-Mg de la serie 5xxx, obtenida por un proceso convencional de laminación.

Ambas aleaciones fueron seccionadas para obtener probetas con las dimensiones mencionadas anteriormente, estas fueron sometidas al proceso de hammering, enseguida se realizaron pruebas de microdureza para evaluar las propiedades mecánicas, se caracterizó en forma microestructural, lo anterior para relacionar estos resultados con las condiciones de procesamiento.

La composición química nominal de la aleación de la serie 6xxx (Al-mg-Si) se presenta en la tabla 8 y la tabla 9 presenta la composición nominal de una aleación de la serie 5xxx, (Al-Mg). Para la serie 6xxx se adquirieron barras de esta aleación con un área de 12.5 x 12.5 mm en su sección transversal, por un metro de longitud, estas barras de Al 6060 fueron cortadas a cada 50 mm de longitud sin modificar su sección transversal. Para la serie 5xxx se adquirió una placa de esta aleación, la placa de Al 5083 fue cortada a las medias de las probetas estándar: sección transversal de 20 x 12.5 mm y longitud de 50 mm. Durante el proceso de corte se enfrió con agua evitando su calentamiento.

Tabla 8 Composición química nominal 6060 T6 [32].

Tabla 2.2 - Composición química de aleación de aluminio 6060 T5 alloy (wt.%)								
Alloy	Mg	Si	Fe	Zn	Cu	Ti	Mn	Cr
6060	0.35-0.6	0.3-0.6	0.1-0.3	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1

Tabla 9 Composición química nominal 5083 H116 (1/8 hard) [33].

Tabla 2.3 - Composición química de aleación de aluminio 5083 H116 (1/8 hard) (wt.%)								
Alloy	Mg	Ti	Fe	Zn	Cu	Ti	Mn	Cr
5083	4-4.9	0.15	0.4	0.25	0.1	0.1	0.4-1	0.05-0.25

2.3 Diagrama de experimentación de las aleaciones de aluminio

En figura 19 se muestra el diagrama general de experimentación de ambas aleaciones de aluminio.

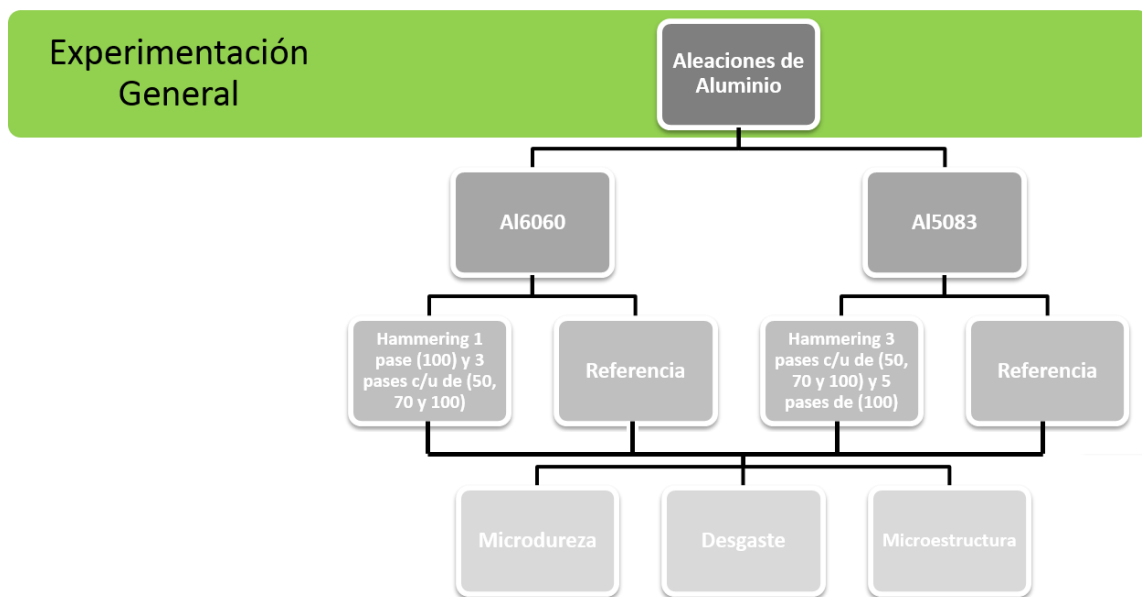


Figura 19 Diagrama de experimentación de ambas aleaciones

2.4 Secuencia del proceso de Hammering

Se describe a continuación el proceso de hammering desarrollado para este trabajo.

2.4.1 Secuencia del proceso para aleación 6xxx

En esta aleación la probeta se sometió a 1 pase, el cual corresponde a una línea de deformación de 100 repeticiones y a 3 pases de 50, 70 y 100 repeticiones respectivamente, la punta semiesférica realiza el proceso de hammering como lo muestra la figura 20.

La probeta de la aleación 6xxx antes del proceso hammering se observa en la figura 21.

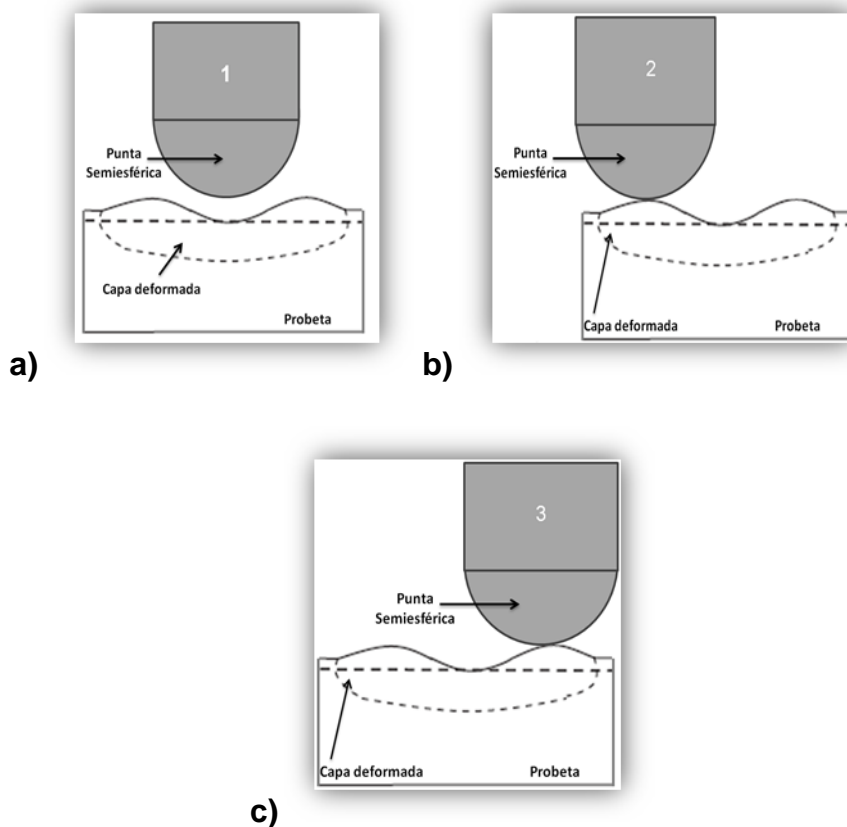


Figura 20 Diagrama del proceso de hammering en 6xxx y 5xxx; a) 1 pase, b) y c) 3 pases

2.4.2 Secuencia del proceso para aleación 5xxx

En esta aleación las probetas se sometieron a 5 pases el cual corresponde a cinco líneas de deformación de 100 repeticiones y 3 pases de 50, 70 y 100 repeticiones respectivamente, el proceso de hammering lo muestran la figura 20.

La probeta aleación 5xxx antes del proceso hammering se observa en la figura 22.

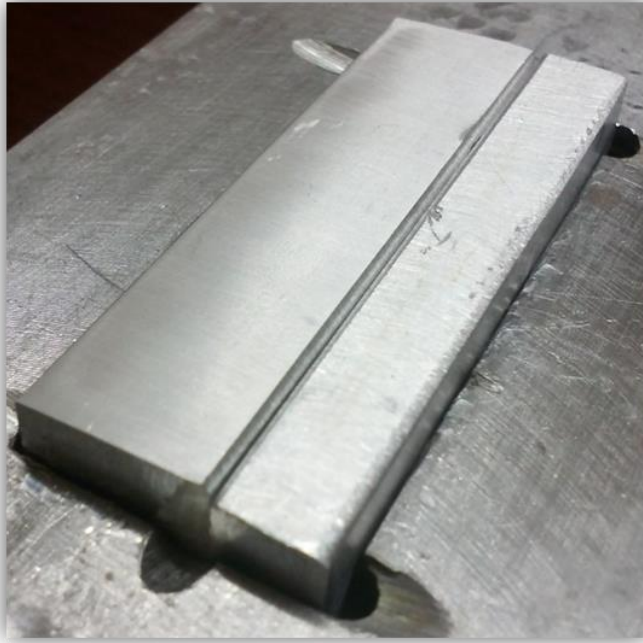


Figura 21 Probeta aleación 6xxx antes del proceso de Hammering



Figura 22 Probeta aleación 5xxx antes del proceso de Hammering

2.5 Procesamiento por Hammering

Previo al proceso de hammering el interior del porta muestras fue lubricado con aceite de motor, con el fin de evitar la adherencia generada por la expansión del material durante el proceso así como también el ajuste de opresores para evitar algún movimiento de la pieza al iniciar el proceso.

Se estableció un ajuste en el golpeteo del roto-martillo para todas las probetas la cual fue la máxima que permite un trabajo uniforme, más allá de esta se presenta deformación excesiva.

El avance y regreso del eje “y” del tornillo de banco fue medido y la velocidad promedio se presenta en la tabla 10:

Tabla 10 Velocidades del tornillo de banco

Velocidad	
Avance	Regreso
2.97 mm/s	2.80 mm/s

La frecuencia de golpes (BPM) durante el proceso de hammering se determinó mediante el análisis del ruido generado por los golpes durante el procesamiento, el archivo de audio fue analizado utilizando el programa **Audacity** (*Audio editor for recording audio*) para analizar el espectro generado por cada golpe.

A continuación se muestra el diagrama de la secuencia de utilizada para el proceso de hammering para ambas aleaciones.

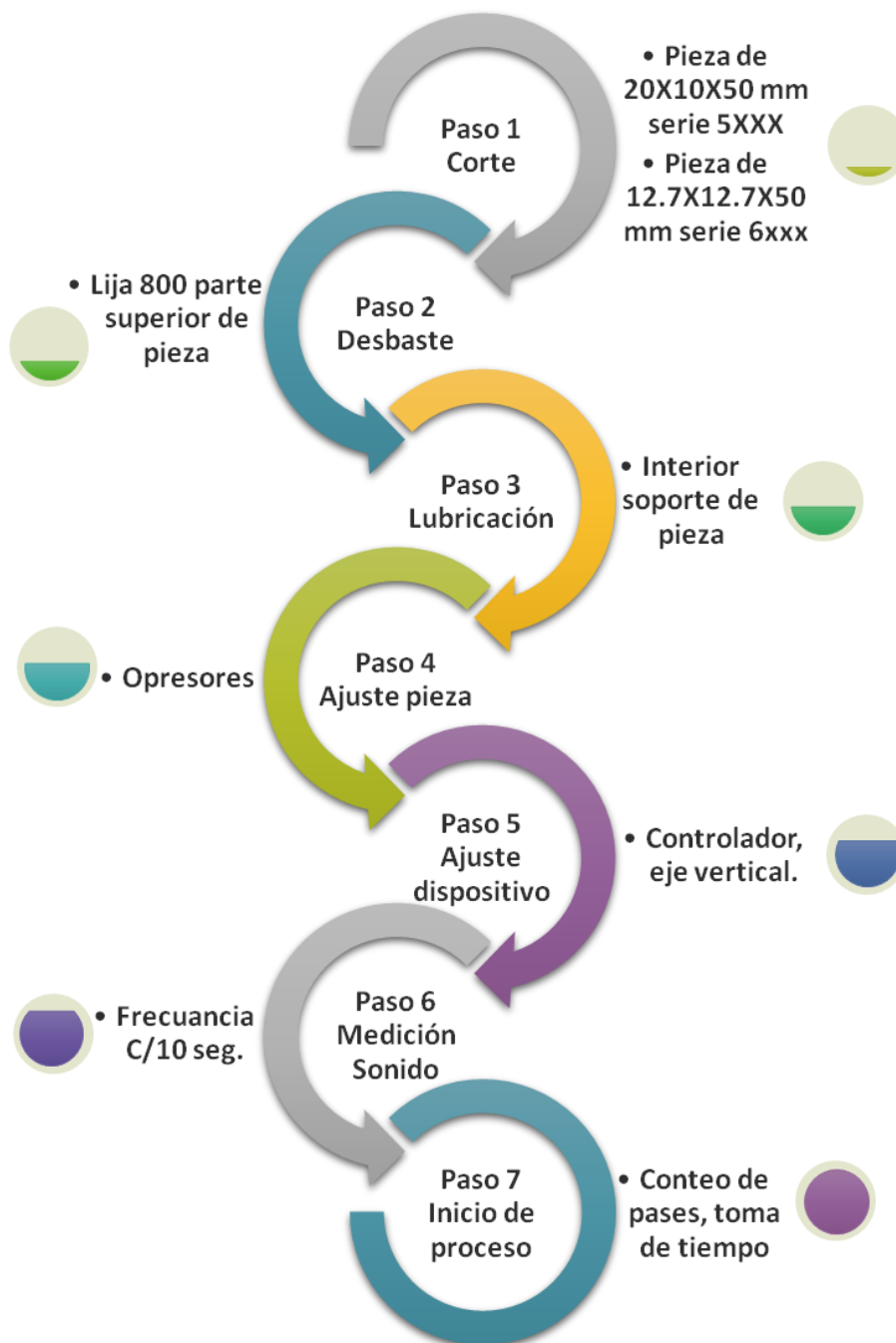


Figura 23 Secuencia de procesamiento por hammering para ambas aleaciones

2.5.1 Probeta aleación 6xxx

Una probeta fue sometida a una secuencia de 1 pase de 100 repeticiones (figura 24) los parámetros de procesamiento, registrados en los pases se exhiben en la tabla 11, un proceso complementario se realizó en una de las probetas procesadas bajo estas condiciones de procesamiento, el cual consistió en un tratamiento térmico de envejecido, los resultados se muestran en anexo 2.

Tabla 11 Procesamiento 1 Al6060

Pases	Repeticiones	Tiempo (min)	# de Golpes
1	100	25:33	38325



Figura 24 Probeta Al 6060 trabajada mediante la técnica hammering 1 Pase - 100 Repeticiones

Además otras probetas fueron sometidas a una secuencia de 50, 70 y 100 repeticiones cada uno en 3 pases de golpe (a, b y c) (figura 25), los parámetros de procesamiento, registrados en los pases se exhiben en la tabla 12.

Tabla 12 Procesamiento 2 Al6060

Repeticiones	Pases	Tiempo (min)	Tiempo Total	# de Golpes	Total
50	a	14:55		20585	
	b	14:10		20400	
	c	14:25	43:30	20760	61745
70	a	18:14		25162	
	b	18:55		24970	
	c	18:40	55:49	25760	75892
100	a	25:48		35604	
	b	25:35		36317	
	c	25:59	01:17:22	35857	107778



Figura 25 Probeta Al 6060 trabajada mediante la técnica hammering 3 Pases – 100 Repeticiones.

2.5.2 Probeta aleación 5xxx

Una probeta fue sometida a una secuencia de 5 pases de 100 repeticiones (figura 26), los parámetros de procesamiento, registrados en los pases se exhiben en la tabla 13, un proceso complementario se realizó en una probeta de esta aleación, el cual consistió en un proceso de hammering estacionario durante 120 minutos, los resultados se muestran en anexo 1.

Tabla 13 Procesamiento 1 Al5083

Repeticiones	Pases	Tiempo (min)	# de Golpes	Total
100	1	26:15	37090	
	2	26:05	36770	
	3	25:45	36328	
	4	25:37	36046	
	5	25:30	36720	182954



Figura 26 Probeta Al 5083 trabajada mediante la técnica hammering 5 Pases – 100 Repeticiones.

Probetas adicionales fueron procesadas con una secuencia de 50, 70 y 100, repeticiones cada uno en 3 pases de golpe (a, b y c) (figura 27), los parámetros de procesamiento, registrados en los pases se presentan en la tabla 14.

Tabla 14 Procesamiento 2 Al5083

Repeticiones	Pases	Tiempo (min)	Tiempo Total	# de Golpes	Total
50	a	13:35		21252	
	b	13:20		19174	
	c	14:05	41:00	20400	60826
70	a	18:30		26958	
	b	18:53		26624	
	c	18:40	56:03	26635	80217
100	a	26:02		37027	
	b	26:12		35891	
	c	25:56	01:18:10	36445	109363



Figura 27 Probeta Al 5083 trabajada mediante la técnica hammering 3 Pases - 100 Repeticiones.

2.6 Preparación de muestras procesadas por Hammering

Como se mencionó previamente la caracterización se dividió en mecánica y microestructural. Por la parte mecánica se realizaron mediciones de microdureza (matrices y promedios) y pruebas de desgaste utilizando un tribómetro pin-on-disk. La parte microestructural se caracterizó mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM). Cabe mencionar que la caracterización tanto mecánica como microestructural, se concentró en analizar la zona central de la muestra en su sección transversal.

- **Corte de muestras**

Todas las muestras fueron marcadas para cortarse por la sección transversal. Se utilizó una cortadora automática Struers modelo Accutom-5 con disco de diamante de un espesor de 0.5 mm, se cortó a 2500 revoluciones por minuto y se programó un avance de 0.5 mm/min enfriando con agua.

- **Montaje**

Todas las muestras fueron montadas en frío con resina acrílica DuroCit (Struers) de rápido curado para no afectar las propiedades mecánicas por efecto de la temperatura (figura 28).



Figura 28 Corte Transversal de la probeta procesada por Hammering, montada en resina.

- **Desbaste y pulido de muestras [34].**

Las probetas se desbastaron utilizando papel de SiC No. 800, 1200 y 2400, a 250 rpm, hasta que la superficie sea coplanar y se elimine el daño de corte. Cada muestra se enjuaga y se secó.

Para el pulido se utilizó suspensión de diamante Struers DiaDuo-2 de 9-micras la cual se aplica en un paño. Todas las muestras se pulen durante 7 minutos. Al completar la mitad del ciclo, la superficie se humedece nuevamente al rociar suspensión y se completa el ciclo. Posteriormente se enjuagó con agua, después con alcohol seguido por el secado.

En el siguiente paso se utiliza suspensión de diamante Struers DiaDuo-2 de 3-micras en un paño de la misma manera que el paso anterior excepto que esta etapa tiene una duración de 5 minutos.

Posteriormente se utiliza suspensión de diamante Struers DiaDuo-2 de 1-micra en un paño de la misma manera que los pasos anteriores, excepto que esta etapa tiene una duración de 4 minutos.

Finalmente se utiliza sílica coloidal Struers OP-U en un paño con una duración de 3 minutos. Al término del proceso anterior se muestra el acabado espejo característico.

2.7 Caracterización mecánica

2.7.1 Microdureza

Se les realizaron mediciones de microdureza en probetas de las aleaciones de aluminio de referencia, además de las procesadas por la técnica de Hammering. Todas las muestras fueron montadas con resina en frío para no ver afectadas las propiedades mecánicas por efecto de la temperatura. Una vez montadas las muestras se realizó el proceso de desbaste y pulido descrito en el punto 2.6.

Con el fin de determinar el espesor de una capa endurecida, se midieron los perfiles de dureza de sección transversal de las muestras procesadas.

La dureza de los materiales nanocristalinos obedece a la relación de Hall-Petch [10, 11]:

$$H = H_0 + k d^{-1/2} \quad (1)$$

Donde H y d son la dureza y tamaño promedio de grano, respectivamente, H_0 y k son constantes del material. Sin embargo, si el tamaño de grano es demasiado pequeño, por ejemplo, por debajo de 10 nm, la dureza y el tamaño de grano no puede seguir a la relación de Hall-Petch [12-14].

La carga utilizada para las muestras fue de 980.7 mN (100 grf) por 15 segundos de acuerdo a la norma ASTM E384 [62]. El equipo utilizado fue un microdurómetro Shimadzu figura 29.



Figura 29 Microdurómetro Shimadzu

Se realizó una matriz de indentaciones en la parte de la capa endurecida, la matriz (figura 30) contiene tanto el área de la capa endurecida como la matriz del material, de esta manera se puede observar la caída de dureza a su valor de referencia.

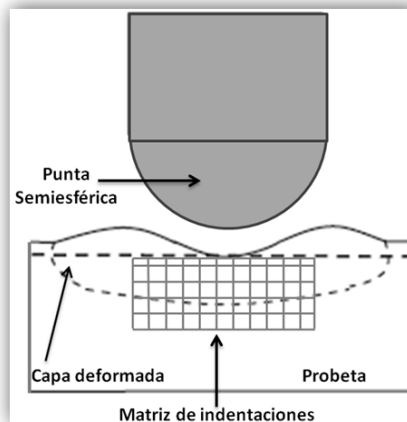


Figura 30 Preparación de muestras para caracterización micro estructural

Los parámetros de procesamiento de las probetas de Al6060 y Al 5083, registrados en las pruebas de dureza se muestran en la tabla 15 y tabla 16 respectivamente, se dejó un espaciamiento de 0.25 mm en “x” y de 0, 0.25, 1, 2, 3, 4, 5.5 mm en “y” entre cada indentación para el Al6060 y de 0, 0.25, 1, 2, 3 mm para el Al5083. La figura 31 y 32 muestra la sección transversal de una muestra indentada de Al 6060 y 5083 respectivamente.

Tabla 15 Indentaciones Al6060 (Largo y Ancho en mm)

Matriz 6060					
Repeticiones	Largo (mm)	Ancho (mm)	# Filas	# Columnas	Indentaciones
50	6	5.5	7	24	168
70	6.25	5.5	7	25	175
100	6.25	5.5	7	25	175

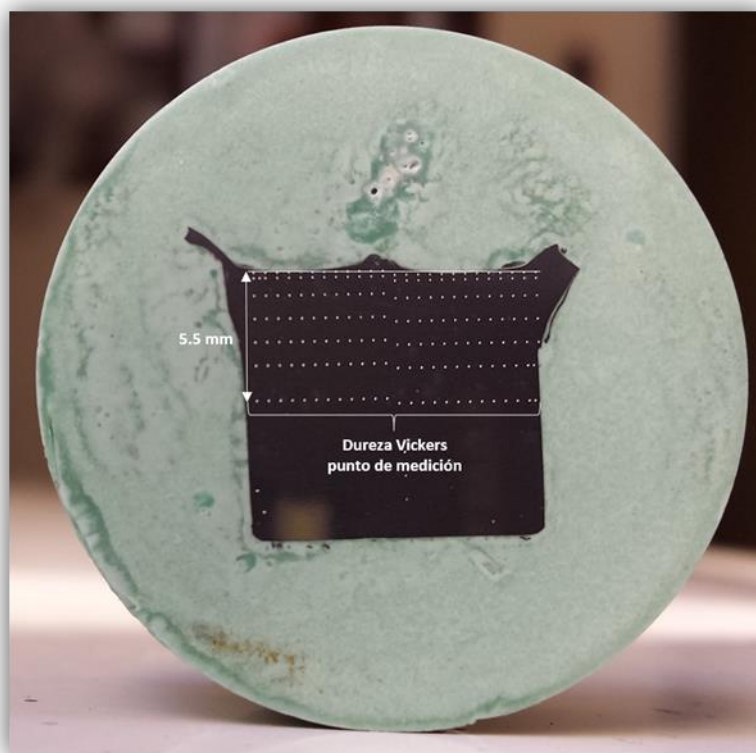


Figura 31 Sección transversal probeta Al6060 indentada

Tabla 16 Indentaciones Al5083 (Largo y Ancho en mm)

Matriz 5083					
Repeticiones	Largo (mm)	Ancho (mm)	# Filas	# Columnas	Indentaciones
50	7.75	3	5	31	155
70	7.5	3	5	30	150
100	7.25	3	5	29	145

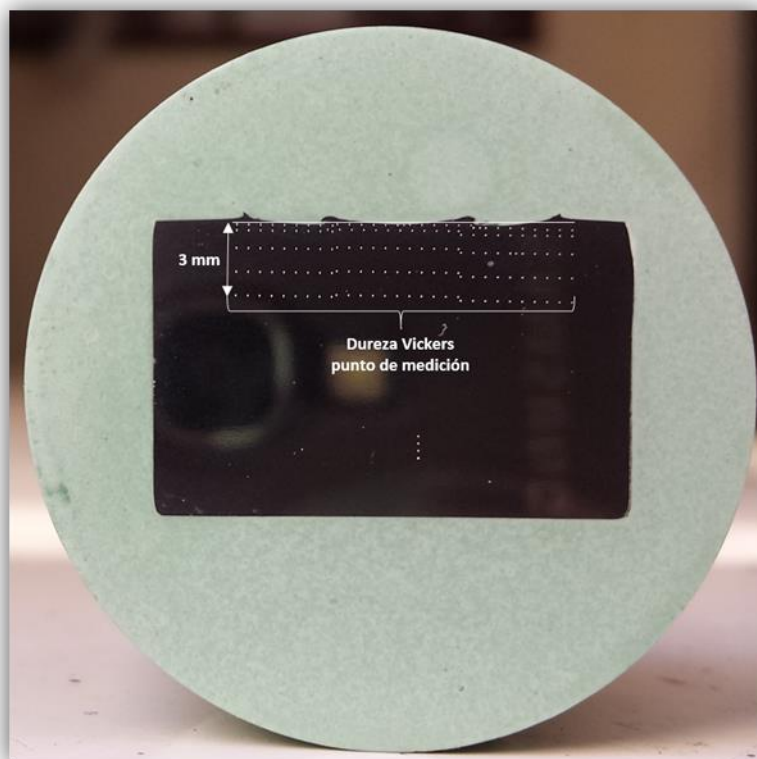


Figura 32 Sección transversal probeta Al5083 indentada

2.7.2 Pruebas de desgaste

Debido a la importancia tecnológica de desgaste [35] y la falta de información relativa a estos fenómenos en los materiales procesados por hammering, en tema de la evaluación de las propiedades de desgaste se realizaron pruebas tribológicas. Las probetas de aluminio de referencia, las procesadas por la técnica de ambas series de aleación se sometieron a dichas pruebas.

Investigaciones anteriores han establecido que los materiales UFG poseen propiedades mecánicas superiores a sus contrapartes de grano grueso (CG), incluyendo una combinación de alta resistencia, buena ductilidad a temperatura ambiente y alta tasa de deformación. Por el contrario, las propiedades tribológicas de los materiales UFG han recibido una atención limitada.

Resistencia al desgaste es una propiedad importante para los materiales UFG con el fin de evaluar su potencial para su uso como componentes estructurales. Los mecanismos tradicionales de desgaste generalmente se clasifican en distintos modos de desgaste: la abrasión, adherencia, desgaste por fatiga, desgaste corrosivo y fretting [36]. Por esta razón las propiedades de desgaste deben considerarse en el diseño de piezas de ingeniería y esto es especialmente importante para el uso práctico de materiales UFG.

El coeficiente de fricción es un parámetro importante que afecta el rendimiento y la resistencia al desgaste de los componentes estructurales. En la práctica, un menor coeficiente de fricción es deseable, ya que normalmente significa que el material tiene una mejor capacidad de carga.

La resistencia de un material policristalino por lo general sigue la relación de Hall-Petch [37]:

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{1/2} \quad (2)$$

Dónde “ σ ” es la resistencia, “ d ” es el tamaño de grano, σ_0 y k son constantes del material

La ecuación 1 muestra que las aleaciones de UFG tienen alta resistencia debido al tamaño de grano pequeño. Dado que los materiales de UFG tienen una mayor dureza y resistencia que sus contrapartes de CG debido a su tamaño de grano refinado y microestructura, se prevé que tendrán una mayor resistencia al desgaste.

La tabla 17 resume algunos resultados de desgaste para aleaciones de aluminio UFG procesados por SPD, no hay un efecto consistente de procesamiento SPD en las propiedades de desgaste de estos materiales ya que en algunos experimentos conduce a un aumento en la resistencia al desgaste y en otros la resistencia al desgaste disminuye o no tiene ningún efecto significativo.

Tabla 17 Propiedades de desgaste de aleaciones de aluminio procesadas por SPD [38].

Material	SPD (Method)	Wear ring	Counterpart	Linear velocity (m/s)	Sliding distance (m)	Lubrication	Effect of SPD on wear resistance	Wear Mechanism	Reference
Al	ARB	Ball-on-disc	SS	0.035	500	None	Decrease	N/A	Eizadjou et al. [39]
Al	ARB	Ball-on-disc	SS	0.035-0.12	500	Dry/oil/water	Decrease	CG:Ploughing, deformation	Talachi et al. [40]
Al-1050	ECAP	Pin-on-disc	Bronze	0.18	27	None	Decrease	Platelet wear, oxidative wear	Wang et al. [41]
Al-1050	HPT	Pin-on-disc	316 SS	0.18	80	None	Decrease	Platelet wear, oxidative wear	Wang et al. [42]
Al-1100	ARB	Pin-on-disc	304 SS	0.05-0.1	N/A	None	Decrease	Platelet wear	Kim et al. [43,44]
Al-5052	ARB	Pin-on-disc	304 SS	0.05-0.1	N/A	None	Decrease	Platelet wear	Kim et al. [43,45]
Al-6061	ARB	Pin-on-disc	304 SS	N/A	N/A	None	Decrease	N/A	Kim et al. [46]
Al-6061	ARB	Pin-on-disc	SS	0.35-0.12	500	None	Decrease	Delamination	Eizadjou et al. [47]
Al-12%Si	ECAP	Pin-on-disc	AISI 1045	1.1	10400	None	Decrease	Oxidative Wear	Kucukomeroglu [48]
Al-6060	ECAP	Pin-on-disc	ANSI 52100	264 (RPM)	500	Dry/water	Increase	Delamination	Ortiz-Cuellar E. et al. [49]

Para las mediciones de fricción y desgaste se utilizó un tribómetro pin-on-disc. La figura 33 presenta los elementos de un tribómetro, en este sistema una bola de acero se desliza sobre la cara plana de una probeta que gira en un plano horizontal, permitiendo el control de carga, velocidad y la medición de fricción. La fuerza de fricción se mide mediante la restricción del movimiento del balín usando un transductor de fuerza. El desgaste se mide por la examinación microscópica de la probeta después de finalizada la prueba y la determinación de la pérdida de masa. El funcionamiento del tribómetro es de acuerdo con la norma ASTM G99.

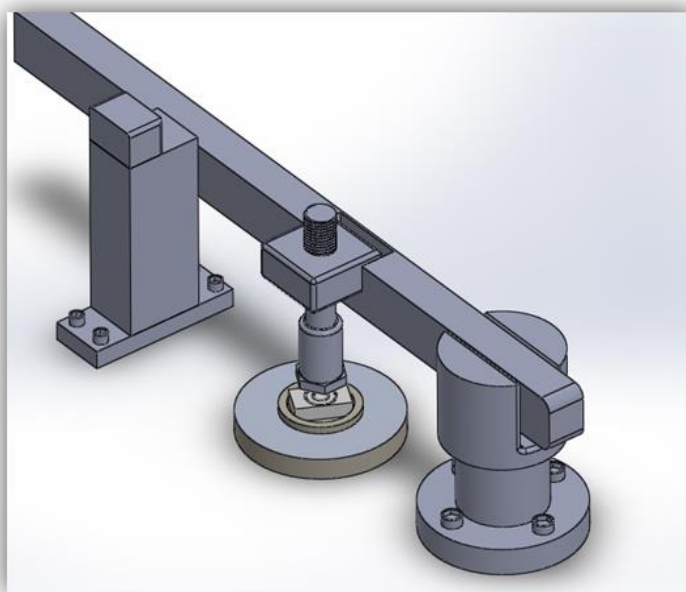


Figura 33 Tribómetro pin-on-disc

Con el fin de evaluar el efecto de la microestructura inicial sobre las propiedades tribológicas, dos grupos de muestras en forma de barras se sometieron a pruebas de desgaste, la primera Al6060 (39 mm × 12.5 mm × 10.5 mm) y la segunda Al5083 (35 mm × 19 mm × 12 mm).

Los parámetros utilizados para pruebas de deslizamiento por desgaste fueron: velocidad de 264 RPM, carga aplicada de 20 N, la distancia de deslizamiento

fue de 500 m, las pruebas se realizaron en seco. El coeficiente de fricción del sistema tribológico se monitorizó continuamente durante los experimentos de desgaste.

El error asociado con la realización de experimentos de deslizamiento en pin-on-disk se tomó en cuenta. Para pruebas en donde el balín no contacta con el eje de rotación del disco, el error en el coeficiente de fricción es menor que 11% y disminuye rápidamente al aumentar el radio de pista. Para los siguientes experimentos el error presente es del 4% [50].

Las probetas de ambas aleaciones de aluminio se deslizaron contra un balín acero cromado G25 AISI 52100 (C 1.0 wt. %, Cr 1.5wt. %, Mg 0.4 wt. %, Si 0.3 wt. %, P 0.2 wt. %). Se utilizaron balines de 10 mm de diámetro de acuerdo a la norma ASTM G99. Las superficies de las probetas de contacto fueron preparadas hasta obtener acabado espejo mediante el proceso de desbaste y pulido descrito en el punto 2.6 (figura 34).



Figura 34 Probeta Al5083 No-Procesada preparada para desgaste

Antes de los ensayos de desgaste, los balines y las probetas se limpiaron con alcohol en un baño de ultrasonido, con el fin de eliminar los contaminantes de la superficie.

Se utilizó el método gravimétrico para evaluar la masa perdida, se siguieron los protocolos ASTM G99-95. El pesaje se llevó a cabo en una balanza digital electrónica de $\pm 10^{-5}$ gramos de exactitud. Cada muestra se midió tres veces, obteniendo el promedio de la pérdida de masa.

Con el fin de evaluar el efecto de la microestructura final sobre las propiedades tribológicas de las probetas procesadas con el método hammering dos conjuntos de muestras en forma de barras la primera Al6060 (13 mm \times 11.5 mm \times 30 mm) y la segunda Al5083 (20 mm \times 12 mm \times 30 mm) se sometieron a pruebas de desgaste utilizando los mismos parámetros que para las pruebas No-procesadas mediante esta técnica.

Debido a que se presenta una superficie irregular después del proceso de hammering (figuras 31 y 32), las probetas se sometieron a desbaste y pulido quitando el área que no fue tomada en cuenta para las pruebas de dureza, las cual coinciden con las pruebas de dureza (figura 35).

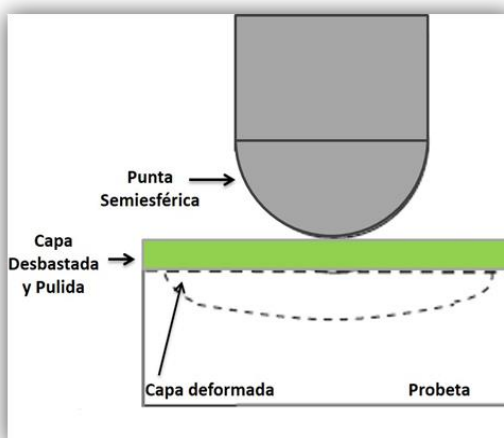


Figura 35 Superficie desbastada y pulida para pruebas de desgaste.

A continuación se muestra el diagrama de la secuencia de utilizada para el proceso de desgaste por deslizamiento para ambas aleaciones.

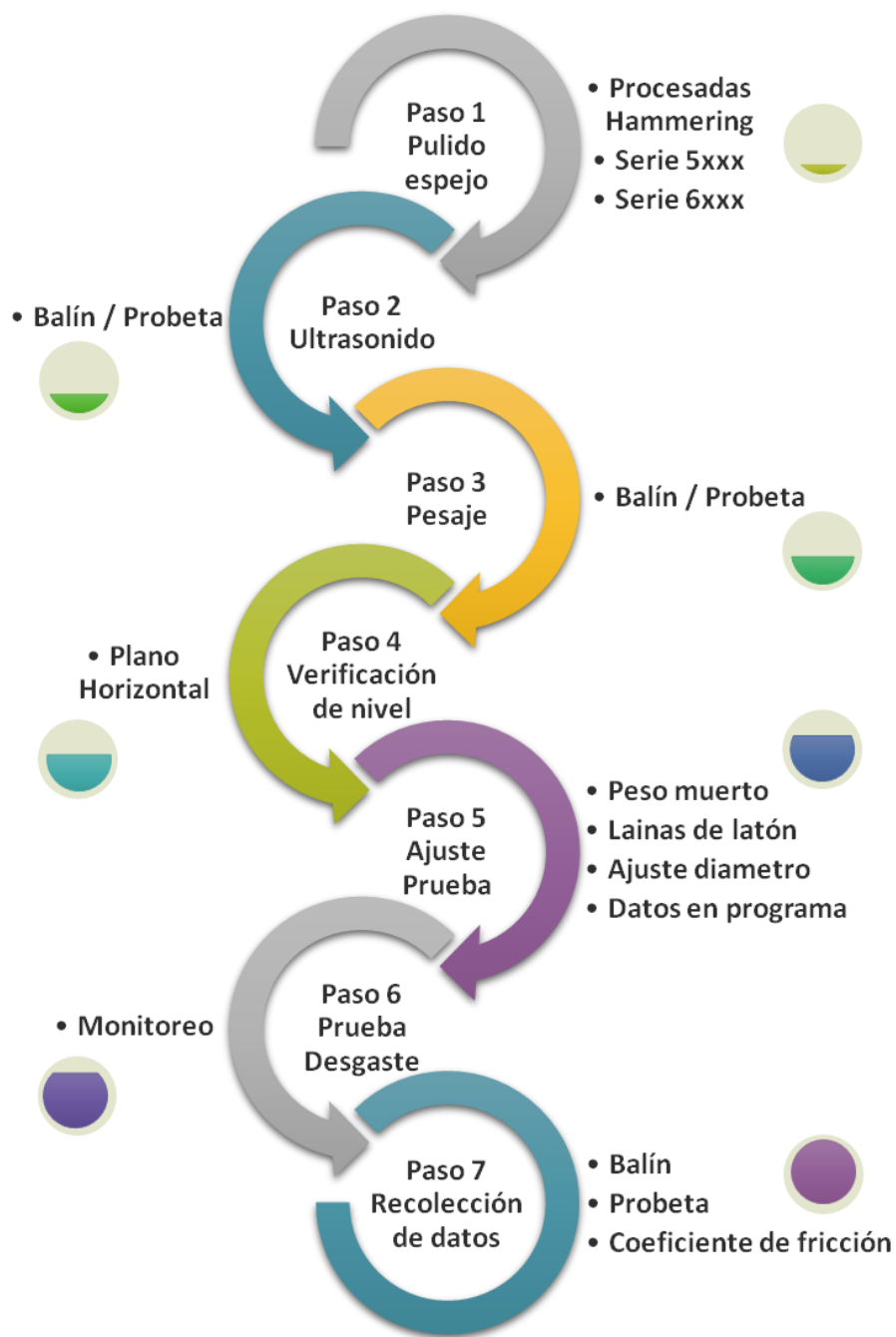


Figura 36 Secuencia de procesamiento por desgaste para ambas aleaciones

2.8 Caracterización microestructural

2.8.1 Preparación para microscopia óptica

Todas las muestras de referencia y las procesadas se prepararon para posterior análisis por microscopia.

Después del pulido de las muestras explicado en el punto anterior (2.6) se atacaron químicamente las muestras para observar su microestructura.

Se han desarrollado diversos ataques [51, 52] para revelar la microestructura del aluminio y sus aleaciones. La muestra se coloca en un pequeño vaso de precipitado conteniendo aproximadamente 100 ml de la solución de ataque, la cual se encuentra pulida y se coloca cara hacia arriba, usando pinzas. Se utilizan las pinzas para proporcionar agitación lo que promueve un ataque uniforme. El ataque es suspendido cuando se produce un grado apropiado de opacamiento de la superficie. La muestra se retira del vaso de precipitado y se enjuaga con agua. Posteriormente esta se enjuaga con alcohol y secada con aire.

Los reactivos de ataque a color se realizan siempre por inmersión. Revelar los límites de grano en las aleaciones de aluminio puede ser difícil, particularmente para algunas aleaciones y por las condiciones de tratamiento térmico que presenten. Por regla general, los grados más bajos de contenido de aleación requieren anodizado para revelar la estructura de grano con luz de polarización cruzada. [34].

El reactivo que se utilizó se describe a continuación:

- **Reactivo Barker's**

El anodizado es un procedimiento de ataque electrolítico que deposita una película sobre la superficie de la muestra para revelar la estructura de grano cuando se observa bajo luz polarizada cruzada. Es la técnica de ataque más ampliamente exitosa para revelar estructuras de grano en aluminio y sus aleaciones, sin embargo no funciona en todas las aleaciones. De los procedimientos y soluciones de anodizado publicados para aluminios, el reactivo de Barker es el más popular [34].

Barker's es un método de ataque electrolítico. La muestra es el ánodo y es paralelo al cátodo. Una corriente continua de 20 V se coloca a través del ánodo y el cátodo, mientras que es inmersa en el electrolito, una solución de 1,8% de ácido fluobórico en agua. Se obtuvieron buenos resultados realizando el ataque en pasos de 15s hasta 75s en ambas aleaciones de aluminio. Después del anodizado, la muestra debe ser observada con luz polarizada, mediante el uso de un polarizador y un analizador, dicha configuración recibe el nombre de "Nicol Cruzados" [53]. En luz de polarización cruzada, los granos se observan en tonalidades de gris desde el blanco al negro. Si se inserta un filtro de tinte sensible (rojo-violeta), los granos son coloreados. La variación en el nivel de color depende de la orientación cristalina de los granos [34]. La figura 37 muestra la celda electrolítica utilizada.



Figura 37 Celda electrolítica, reactivo Barker's

CAPÍTULO III

Análisis de Resultados y Discusión

3.1 Introducción

En el presente capítulo se muestran a los resultados de este trabajo de investigación los cuales incluyen resultados de microdureza y de desgaste, además resultados de la caracterización microestructural mediante microscopía óptica y microscopia de barrido para las superficies después de las pruebas de desgaste.

Se muestran los resultados de cada condición, haciendo comparación principalmente entre las técnicas por hammering y las aleaciones de aluminio sin procesar.

3.2 Microdureza

3.2.1 Aleación de aluminio de referencia

Las indentaciones en las probetas de aluminio de referencia se llevaron a cabo realizando una matriz de 5x4 indentaciones, sobre la zona centro en la sección longitudinal de la muestra. Los resultados se muestran en las tablas 18 y 19.

Tabla 18 Dureza Vickers aleación de aluminio 6060-T6 (No procesada)*

Matriz			
64.7	69.5	70.5	68.3
70.8	67.8	69.9	68.3
70.3	70.1	68.9	70.3
71	66.2	68.5	71.3
69.4	69.4	69.4	68.8
Separación (mm)		Promedio	
0.2		69.17	

*Unidades del promedio HV

Tabla 19 Dureza Vickers aleación de aluminio 5083-H116 (No procesada)*

Matriz			
113	107	113	107
106	106	110	107
112	114	111	112
114	114	113	108
109	113	116	112
Separación (mm)		Promedio	
0.15		110.85	

*Unidades del promedio HV

3.2.2 Aleación de aluminio 6060-T6

La figura 38 presenta el perfil de dureza de la sección transversal de muestras deformadas a diferente número de repeticiones. Como se muestra, la dureza promedio fue de aproximadamente 118 Hv en la superficie superior, se redujo a un valor estable de 75 Hv después de la profundidad alcanzada de 4 milímetros, este valor se consideró como la profundidad de afectación del proceso de hammering en las condiciones estudiadas.

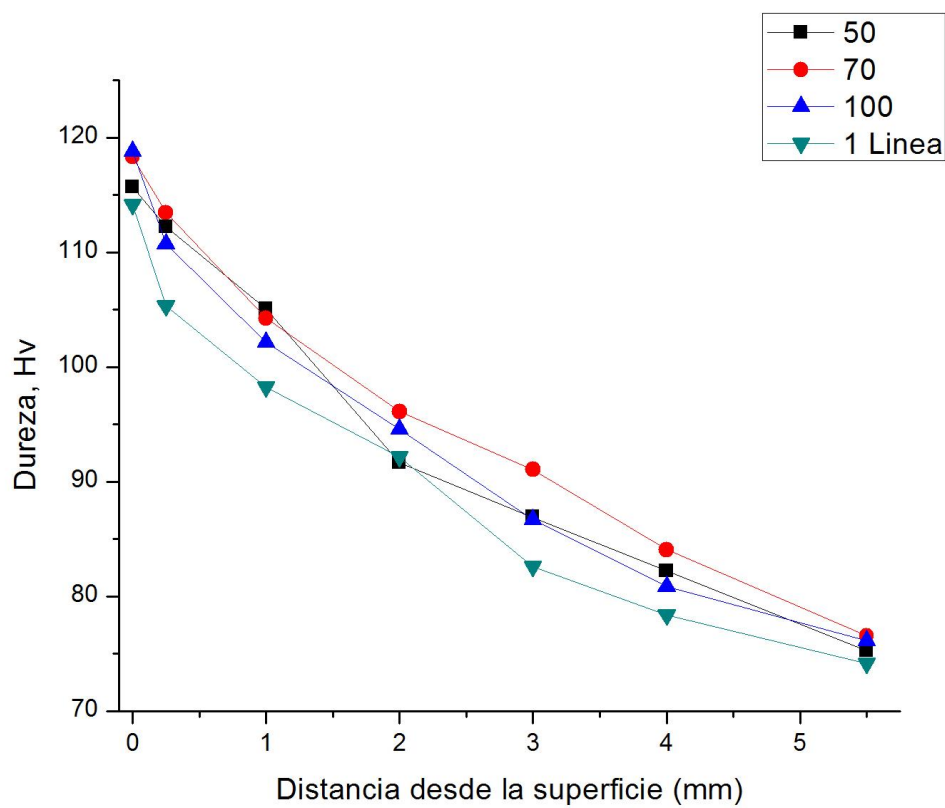


Figura 38 Dureza vs Superficie aleación de aluminio 6060-T6

3.2.3 Aleación de aluminio 5083-H116

La figura 39 ilustra el perfil de dureza de la sección transversal de una muestra deformada a diferente número de repeticiones. Como se muestra, la dureza promedio fue de aproximadamente 154 Hv en la superficie superior, se redujo a un valor estable de 113 Hv después de la profundidad alcanzada de 2 milímetros, este valor se consideró como la profundidad de afectación del proceso de hammering en las condiciones estudiadas.

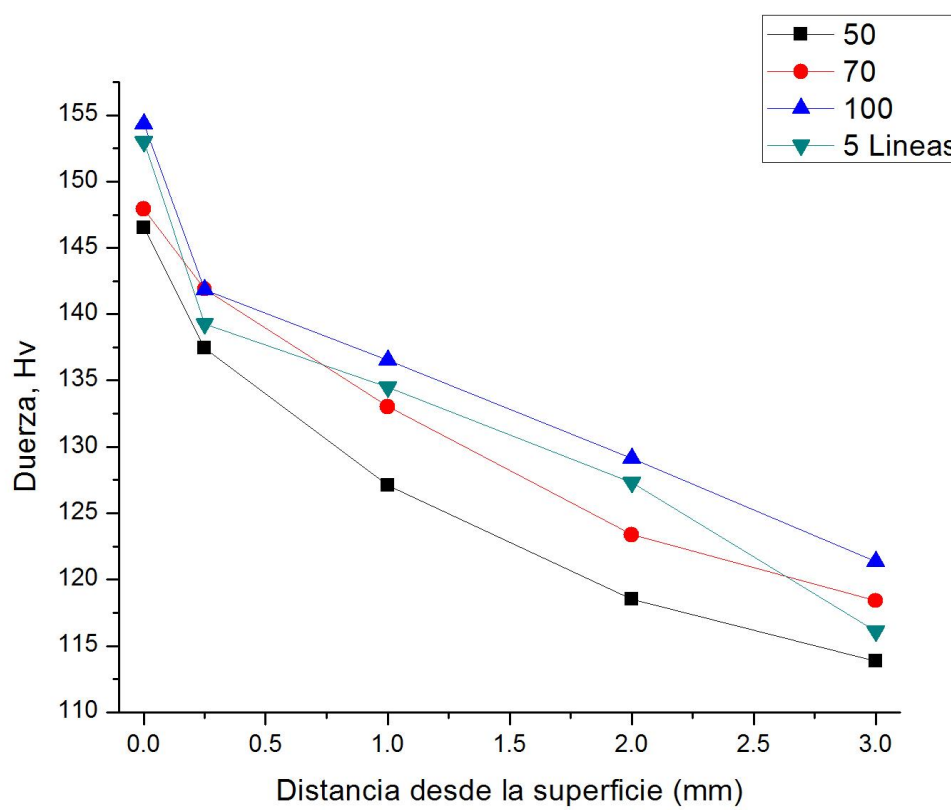


Figura 39 Dureza vs Superficie aleación de aluminio 5083-H116

3.3 Mapas de Microdureza

El mapeo de microdureza se realizó sobre las muestras procesadas en su área transversal con el fin de observar el cambio de la dureza de la capa de superficie endurecida hacia la matriz de la muestra.

3.3.1 Mapeo aleación de aluminio 6060-T6

El mapeo de la probeta procesada con 3 pases de 50 repeticiones (6060-50) se muestra en la figura 40. Se observó un rango de dureza entre 69-136 HV, como se puede apreciar, los valores son altos en la parte superior del material y valores bajos hacia la matriz del mismo, se puede decir que la deformación es más efectiva en la parte central del material donde se espera mayor homogeneidad y consecuentemente generando una mayor cantidad de dislocaciones, lo cual favorece el refinamiento de grano y posiblemente mayor dispersión de precipitados, ha sido reportado que altos niveles de deformación re-distribuyen las partículas presentes en el material y en algunos casos causan fragmentación, produciendo valores de dureza más altos [54].

El mapeo de la probeta procesada con 3 pases de 70 repeticiones (6060-70) se muestra en la figura 41. Se observó un rango de dureza similar a la prueba anterior (6060-50), sin embargo se puede apreciar aparentemente la continuación de la evolución de la microdureza, debido a la acumulación de la deformación a través de cada pase lo cual favorece el refinamiento de grano. La cantidad de colores más cálidos aumenta ligeramente simbolizando mayor deformación efectiva y por consiguiente aumento en la dureza de Al6060.

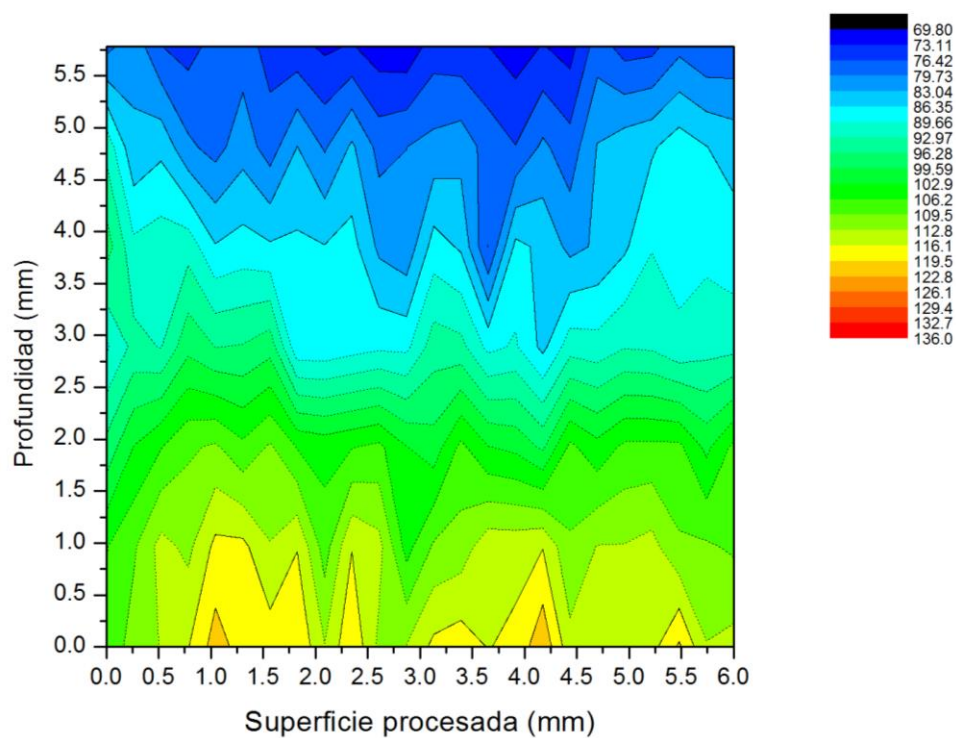


Figura 40 Mapeo aleación de aluminio 6060-T6 procesada 3 Pases - 50 Repeticiones

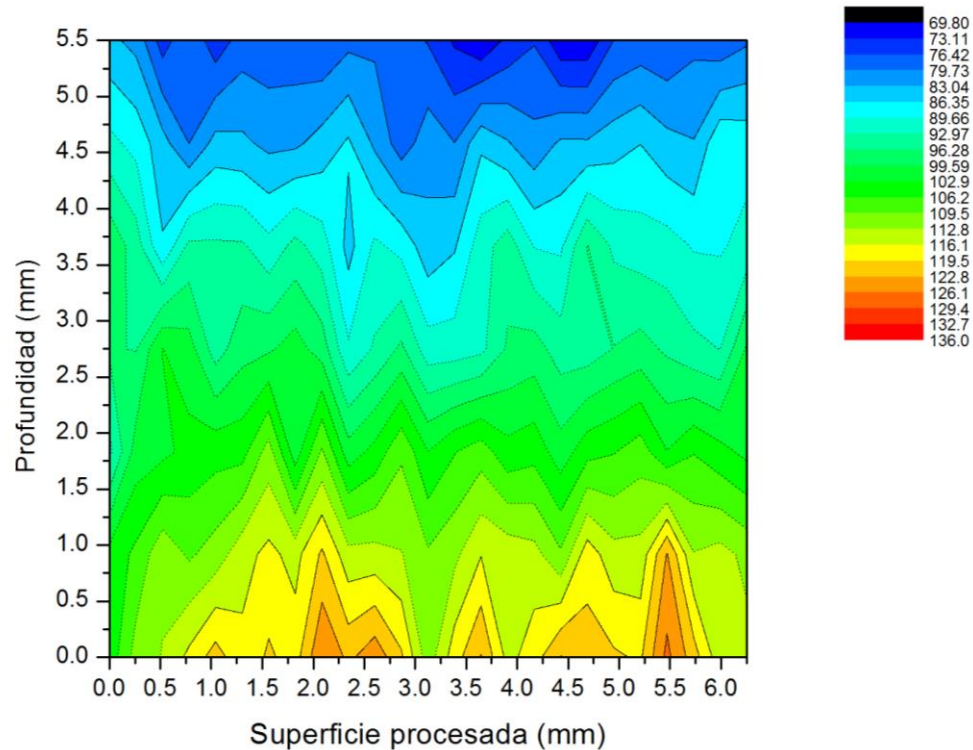


Figura 41 Mapeo aleación de aluminio 6060-T6 procesada 3 Pases - 70 Repeticiones

El mapeo de la probeta procesada con 3 pases de 100 repeticiones (6060-100) se muestra en la figura 42. Se observó un rango de dureza similar a las pruebas anteriores, se aprecia una reordenamiento en la estructura de la capa endurecida en el centro de la matriz comparada con la 6060-70, se puede apreciar aparentemente la continuación de la evolución de la microdureza, debido a la acumulación de la deformación.

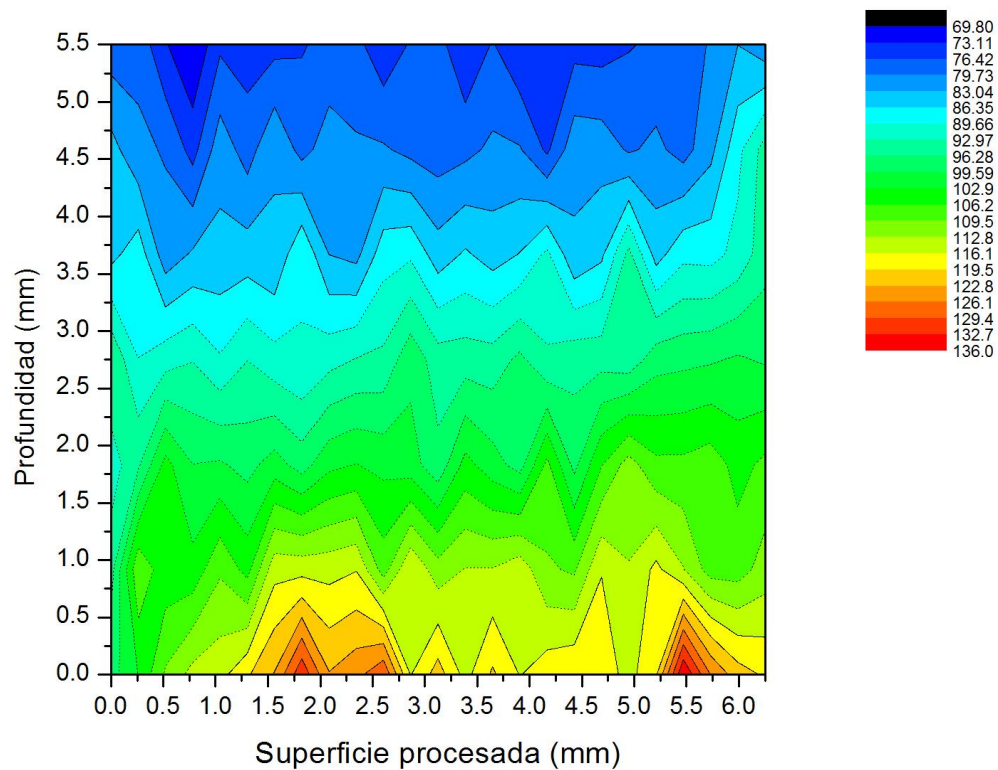


Figura 42 Mapeo aleación de aluminio 6060-T6 procesada 3 Pases - 100 Repeticiones

El mapeo de la probeta procesada con 1 Pase de 100 Repeticiones se muestra en la figura 43. Se observó un rango de dureza similar a las pruebas anteriores. Al ser un solo pase no hay acumulación de la deformación a través de cada pase por esta razón se aprecia una evolución de la capa endurecida centrada y un espesor de menor comparada con las anteriores.

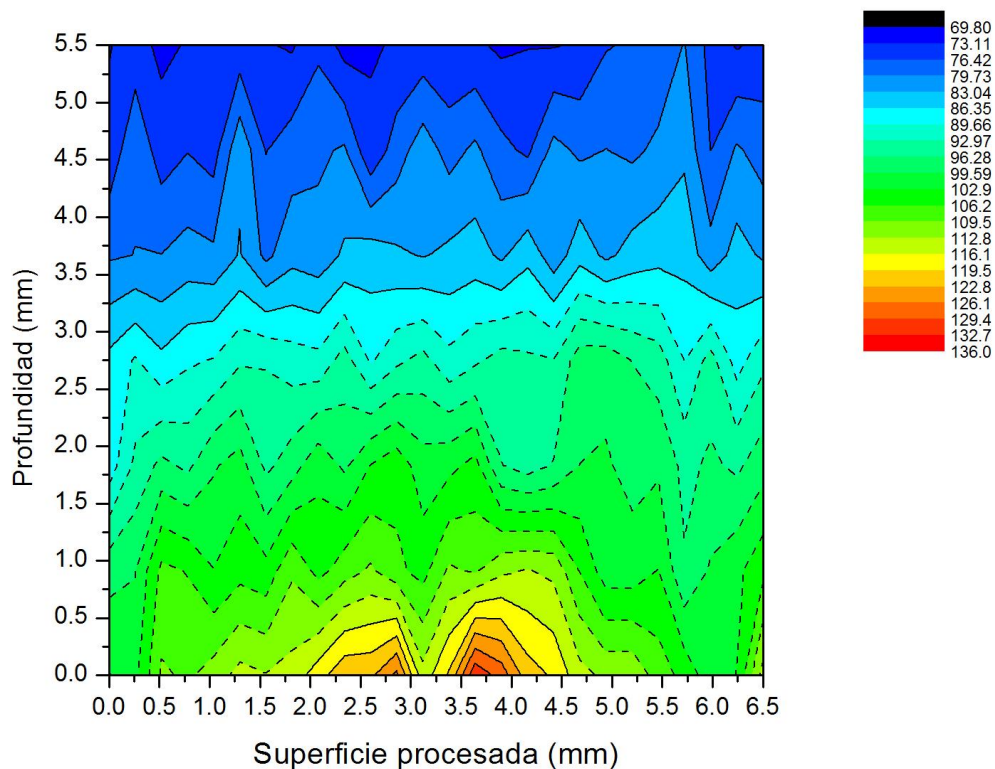


Figura 43 Mapeo aleación de aluminio 6060-T6 procesada 1 Pase - 100 Repeticiones

3.3.2 Mapeo aleación de aluminio 5083-H116

El mapeo de la probeta procesada con 3 pases de 50 repeticiones (5083-50) se muestra en la figura 44. Se observó un rango de dureza entre 105-187 HV, como se puede apreciar, los valores son altos en la parte superior del material y valores bajos hacia la matriz del mismo, se puede decir que la deformación es más efectiva en la parte central del material causando en principio una mayor cantidad de dislocaciones debido a la homogeneidad en esta zona, esto favorece el refinamiento de grano y posiblemente re-distribución de precipitados, produciendo valores de dureza más altos.

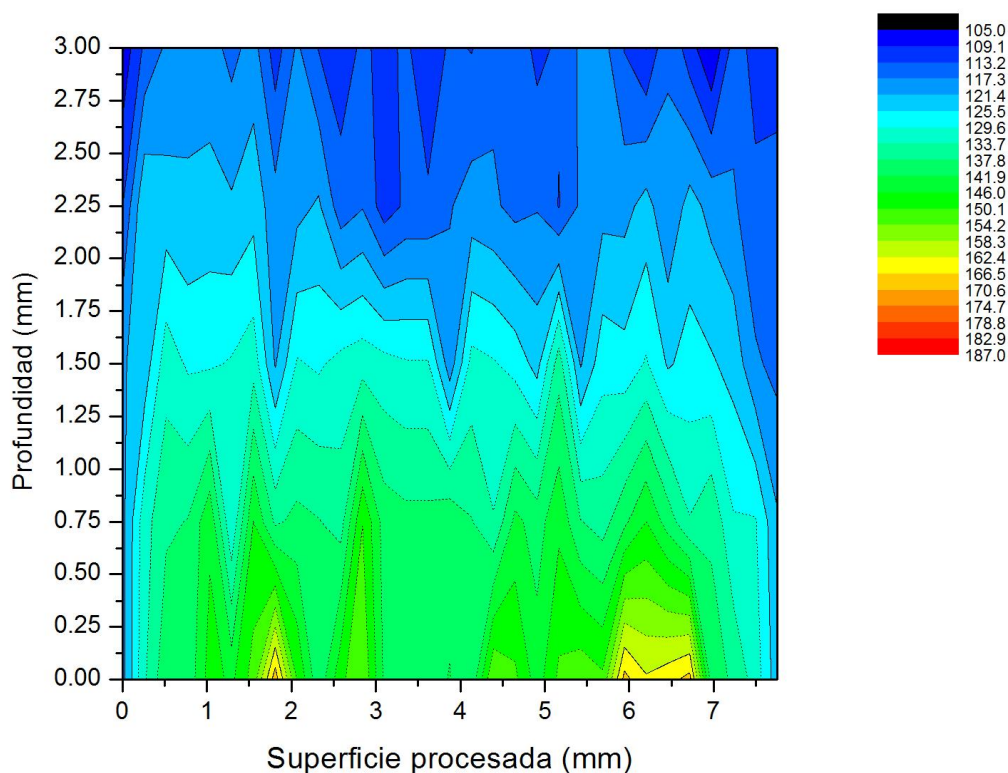


Figura 44 Mapeo aleación de aluminio 5083 procesada 3 Pases - 50 Repeticiones

El mapeo de la probeta procesada con 3 pases de 70 repeticiones (5083-70) se muestra en la figura 45. Se observó un rango de dureza similar a la prueba anterior (5083-50), sin embargo se puede apreciar la continuación de la evolución de la microdureza, debido a la acumulación de la deformación a través de cada pase lo cual favorece el refinamiento de grano.

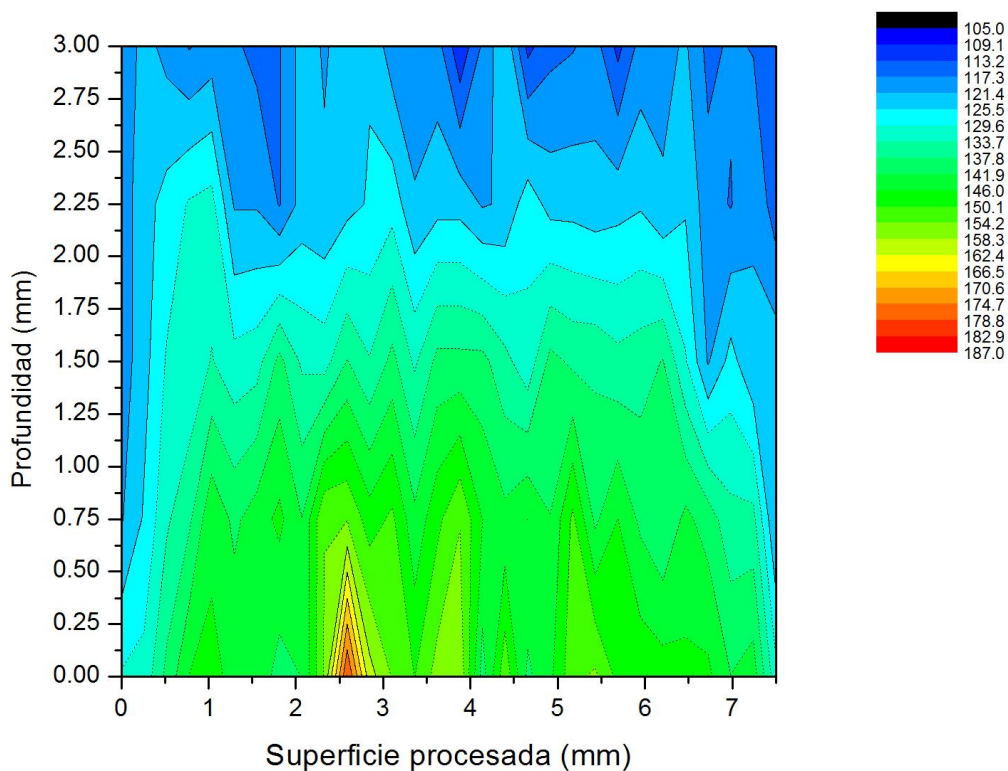


Figura 45 Mapeo aleación de aluminio 5083 procesada 3 Pases - 70 Repeticiones

El mapeo de la probeta procesada con 3 pases de 100 repeticiones (5083-100) y 5 pases de 100 repeticiones se muestra en la figura 46 y 47 respectivamente. Se observó un rango de dureza similar a las pruebas anteriores sin embargo se puede apreciar la continuación de la evolución de la microdureza, debido a las propiedades de la aleación serie 5xxx que presenta endurecimiento por trabajo en frío favoreciendo el refinamiento de grano.

Conforme incrementa el número de pases, se delimitan claramente diversas zonas presentándose una tendencia a homogenizar una mayor área de la muestra. Los colores van desde azules con valores de dureza más bajos, hasta los colores más cálidos simbolizando mayor deformación efectiva y por consiguiente aumento en la dureza del Al5083.

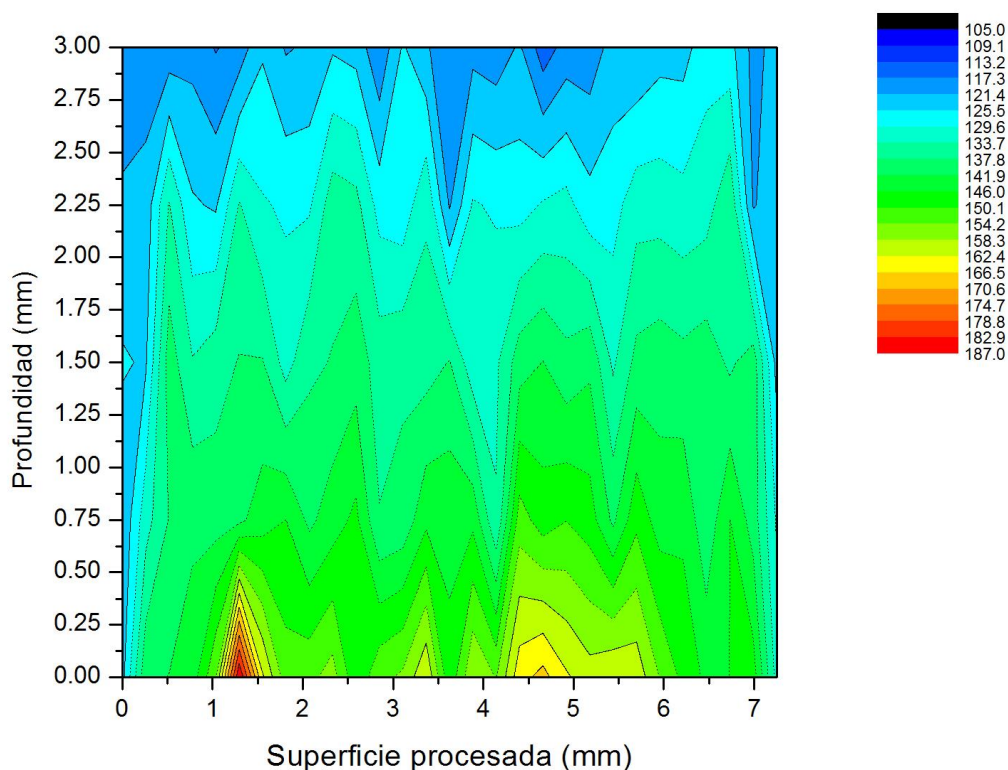


Figura 46 Mapeo aleación de aluminio 5083 procesada 3 Pases - 100 Repeticiones

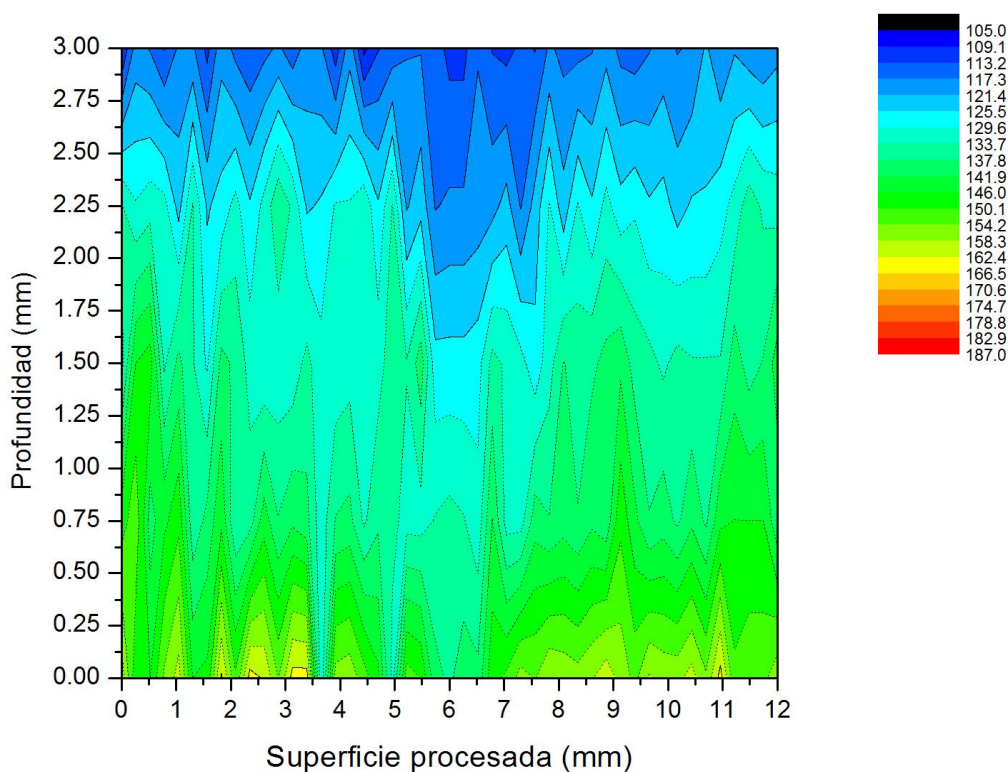


Figura 47 Mapeo aleación de aluminio 5083 procesada 5 Pases - 100 Repeticiones

Las zonas alta deformación encontradas a lo largo de la zona longitudinal del aluminio contribuyen de manera directa en las propiedades mecánicas. La distribución de la deformación posiblemente es consecuencia de varios elementos tales como; el número de pases, cantidad de dislocaciones, acumulación de la deformación, debido a estos factores existen diferencias en los resultados de microdureza.

Entre aleaciones de aluminio se observa que los valores promedios de microdureza de todas las repeticiones son cercanos entre sí, teniendo el valor más alto en Al5083 con 154 Hv y el Al6060 119 Hv.

Comparando el material de referencia con respecto al valor de dureza promedio después del proceso de hammering, el Al6060 de referencia presentó una dureza 69 Hv, esto significa que procesando el material por los tipos de proceso estudiados, se tiene un incremento de hasta un 72.18 % en su dureza, por su parte el Al5083 de referencia presentó una dureza 110 Hv, se tiene un incremento de hasta un 40.29 % en su dureza (tabla 20).

Tabla 20 Incremento en porcentaje de dureza por proceso hammering vs material de referencia

Al5083		Incremento (%)	Al6060		Incremento (%)
Repeticiones	Dureza (Hv)		Repeticiones	Dureza (Hv)	
0	110		0	69	
50	146.52	33.20	50	115.71	67.69
70	147.93	34.48	70	118.32	71.48
100	154.32	40.29	100	118.80	72.18

La relación entre la dureza y $d^{-1/2}$ se examinó y se representa en la figura 48 y 49 lo que representa una forma de la ecuación Hall-Petch:

$$Hv = 60.67 + 84.23 d^{-1/2} (Al6060) \quad (2)$$

$$Hv = 18.58 + 492.13 d^{-1/2} (Al5083) \quad (3)$$

A partir de las ecuaciones anteriores es posible estimar el grado de reducción en el tamaño promedio de grano, obteniendo para Al6060 un valor de 1.5 μm y para Al5083 un valor de 8.5 μm .

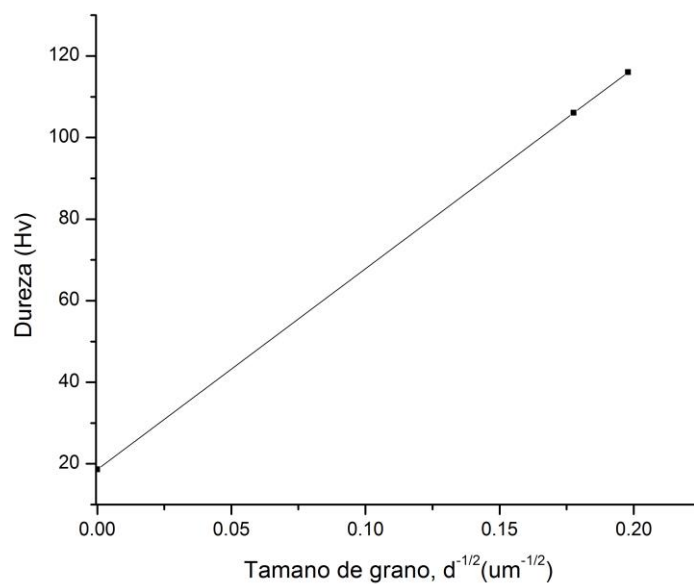


Figura 48 Al5083 Dureza vs Tamaño de grano ($d^{-1/2}$) ($\mu\text{m}^{-1/2}$)

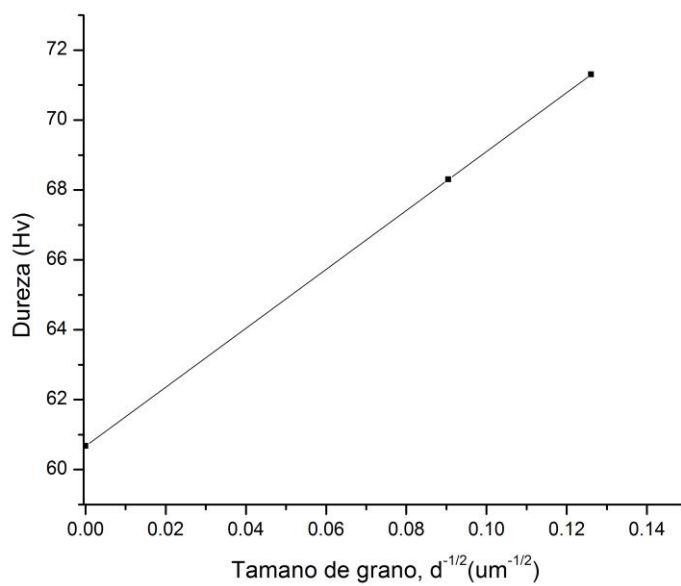


Figura 49 Al6060 Dureza vs Tamaño de grano ($d^{-1/2}$) ($\mu\text{m}^{-1/2}$)

3.4 Microscopia óptica

3.4.1 Al6060 de referencia

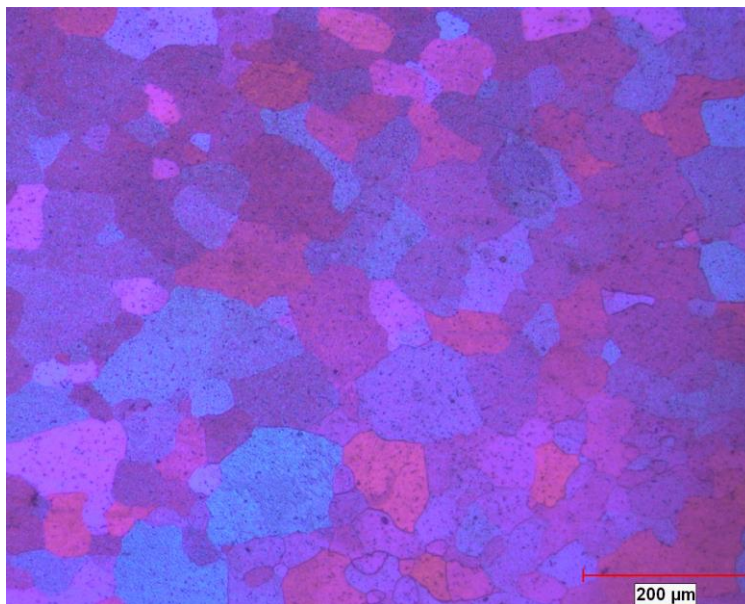


Figura 50 Micrografía Al6060 de referencia (microestructura original).

En la micrografía de la figura 50 se observa la microestructura del aluminio 6060 de referencia, se aprecian los límites de grano considerando estos como tamaño de grano grueso, los principales componentes de esta aleación son Al-Mg-Si.

El tamaño de grano promedio antes de someterse a hammering fue estimado mediante un analizador de imágenes (OLYMPUS Stream®) mediante el método de intersección bajo la norma ASTM E112. En este caso, un patrón (es decir, los círculos, círculos-cruzados, líneas, etc.) se superpone encima de la imagen digital. Cada vez que el patrón superpuesto intersecta con un límite de grano, una intersección se dibuja sobre la imagen (de ahí el nombre de "método de intersección"). Posteriormente el software de análisis de imágenes calcula automáticamente el "Número-G" bajo la norma ASTM E112 que significa la

longitud de intersección, como una función de la cuenta de intersección y de la longitud del patrón (figura 51).

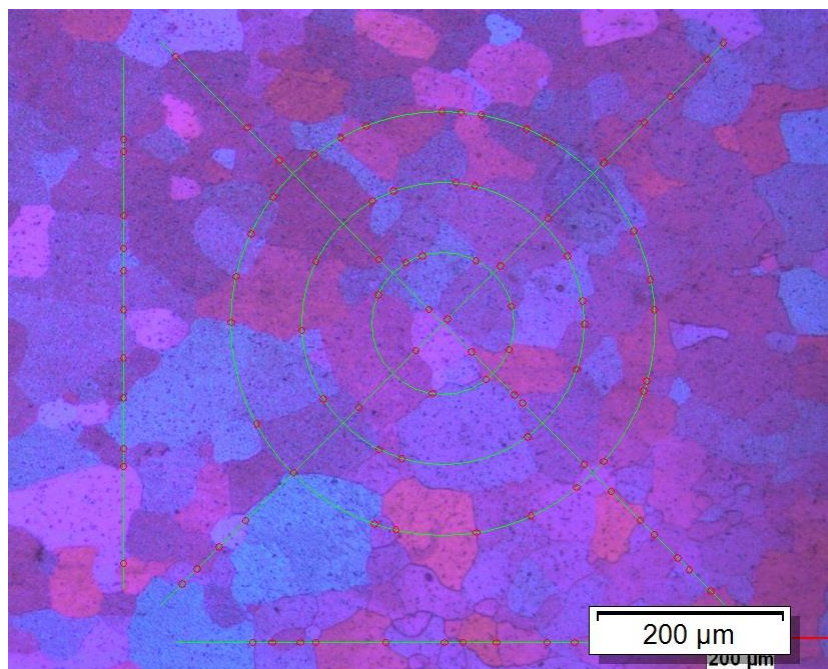


Figura 51 Análisis de grano método de intersección

Dando como resultado un tamaño de grano ASTM G 4.47, diámetro promedio de 76.35 μm , longitud de intersección promedio de 68.06 μm .

3.4.2 Al5083 de referencia

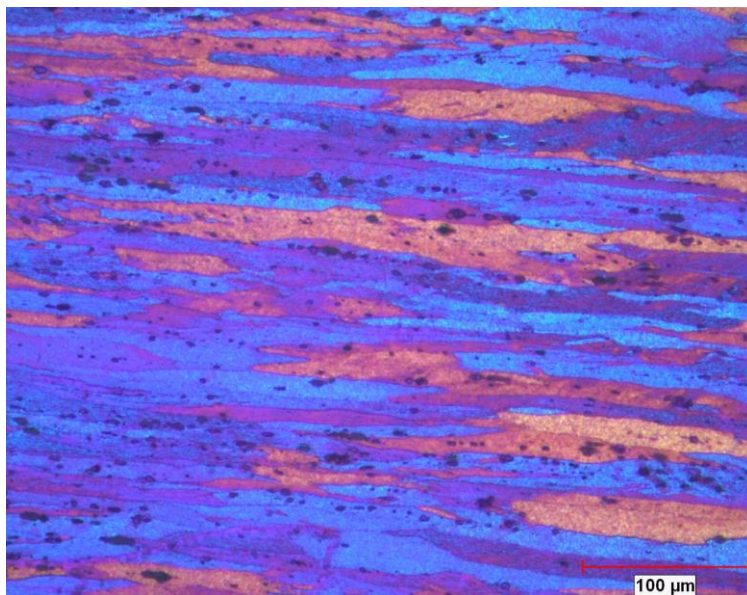


Figura 52 Micrografía Al5083 de referencia (microestructura original).

En la micrografía de la figura 52 se observa la microestructura del aluminio 5083 de referencia, se aprecian los límites de grano alargados en dirección al laminado, los principales componentes de esta aleación son los elementos Al-Mg.

El tamaño de grano promedio fue estimado mediante el método de intersección bajo la norma ASTM E112 dando como resultado un tamaño de grano ASTM G 7.24, diámetro promedio de 29.35 µm, longitud de intersección promedio de 26.14 µm,

Las micrografías anteriores (figura 50 y 52) servirán de referencia para comparar el efecto de la técnica de deformación por hammering en ambas microestructuras así como también el grado de refinamiento.

3.4.3 Al 6060 por técnica de Hammering

En los siguientes perfiles (figuras 53-56) se observa el gradiente microestructural desde la superficie hacia el centro de la muestra. Para cuantificar la capa endurecida, se utilizó un analizador de imágenes ImageJ. En las micrografías de la figura 53 se observa el perfil de la capa endurecida del Al6060 con 50 repeticiones, posterior al proceso de hammering, se estimó el valor de la zona afectada en un valor de $937.1\ \mu\text{m}$ ($0.937\ \text{mm}$).

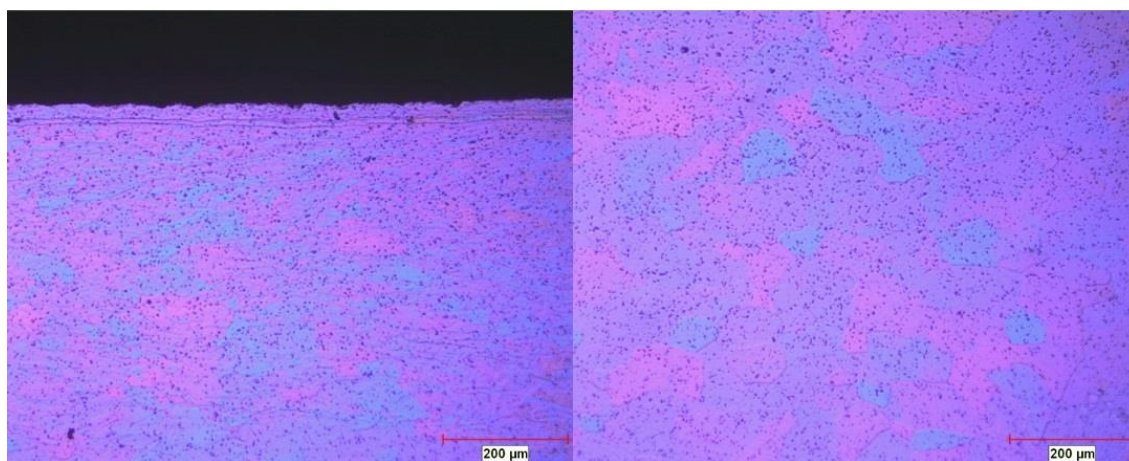


Figura 53 Perfil Al6060 50 Repeticiones Hammering

En las micrografías de la figura 54 se observa el perfil de la capa endurecida del Al6060 con 70 repeticiones, posterior al proceso de hammering, con un valor aproximado de 1,028.8 μm (1.028 mm).

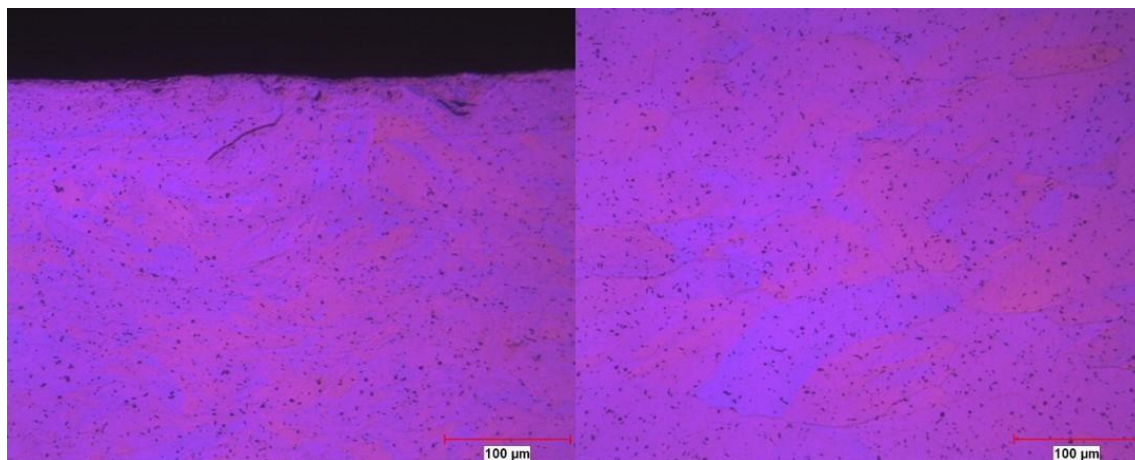


Figura 54 Perfil Al6060 70 Repeticiones Hammering

En las micrografías de las figuras 55 y 56 se observa el perfil de la capa endurecida para el Al6060 con 100 repeticiones, posterior al proceso de hammering, con un valor aproximado de 1068 μm (1.068 mm).

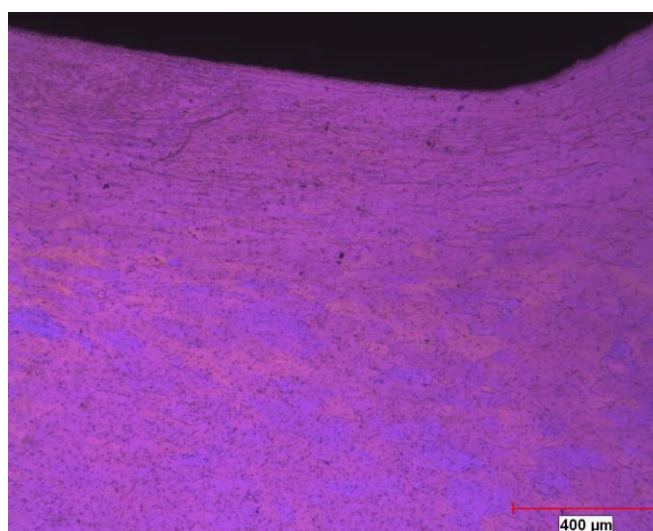


Figura 55 Micrografía Al6060 100 Repeticiones Hammering

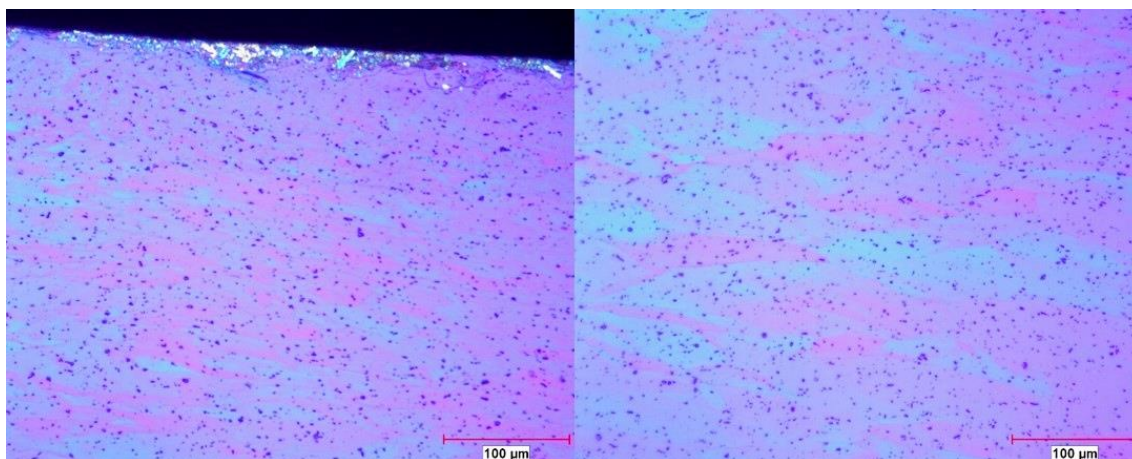


Figura 56 Perfil Al6060 100 Repeticiones Hammering

3.4.5 Al 5083 por técnica de Hammering

En los siguientes perfiles se observa la evolución de la microestructura (figuras 57-59) estas imágenes corresponden a zonas de áreas deformadas.

Para cuantificar la capa endurecida por la técnica, se utilizó un analizador de imágenes, ImageJ. En las micrografías de la figura 57 se observa el perfil de la capa endurecida en Al5083 después de 50 repeticiones en el proceso de hammering, se estimó el valor de la zona afectada en un valor de 370.5 µm (0.370 mm).

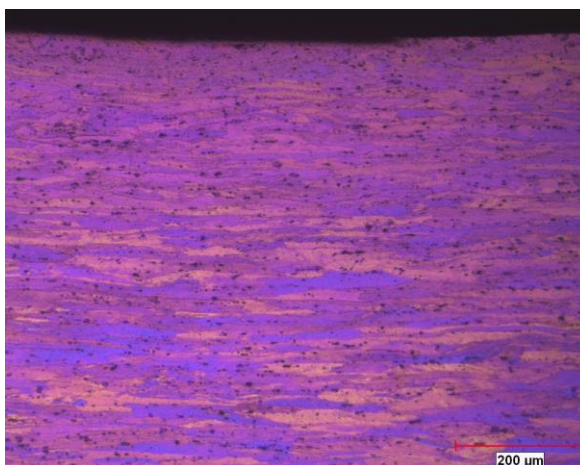


Figura 57 Perfil Al5083 50 Repeticiones Hammering

En las micrografías de la figura 58 se observa el perfil de la capa endurecida en Al5083 70 repeticiones posterior al proceso de hammering, con un valor aproximado de 452.81 µm (0.4528 mm).

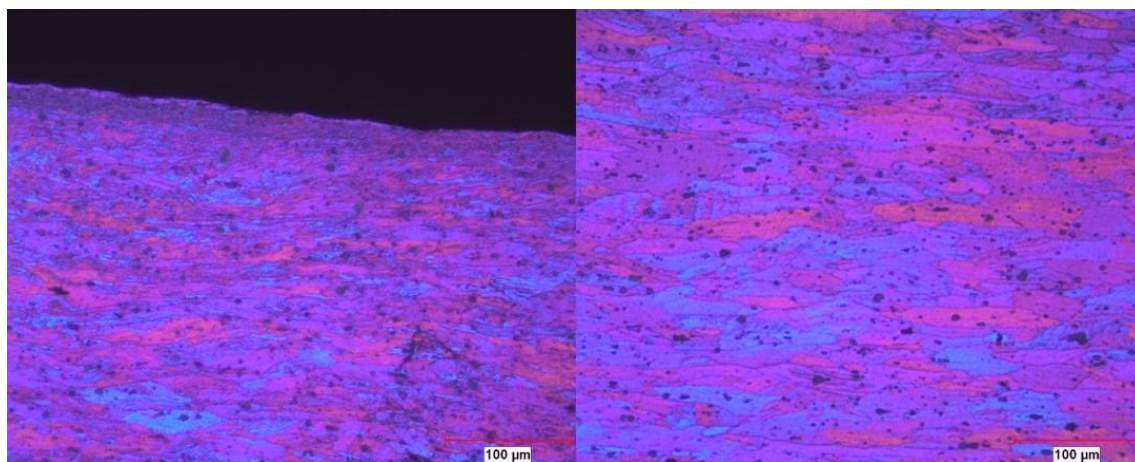


Figura 58 Perfil Al5083 70 Repeticiones Hammering

En las micrografías de la figura 59 se observa el perfil de la capa endurecida en Al5083 100 repeticiones posterior al proceso de hammering, con un valor aproximado de 830.98 µm (0.8309 mm).

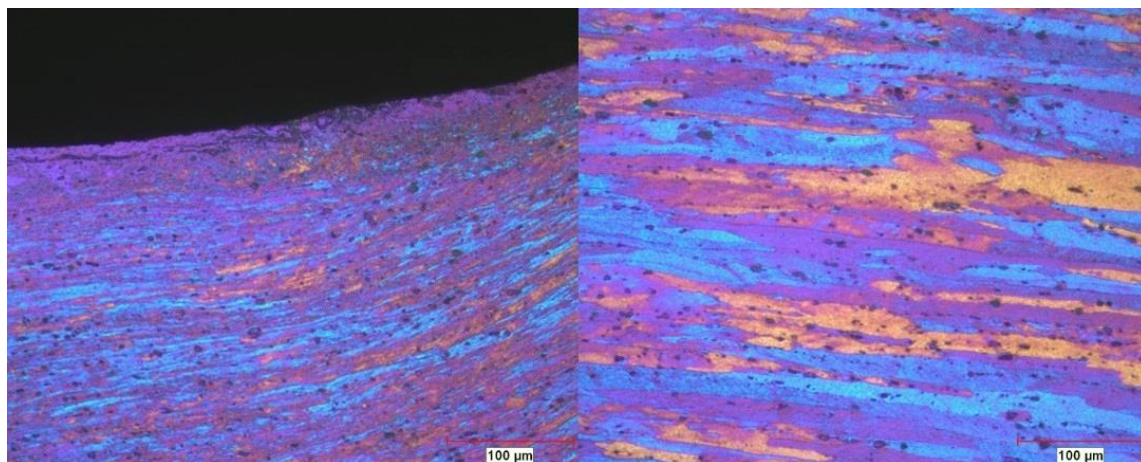


Figura 59 Perfil Al5083 100 Repeticiones Hammering

3.5 Evolución microestructural

La Figura 11 muestra la evolución de la microestructura a lo largo de la sección transversal de las muestras procesadas por hammering.

En el mapeo de la muestra Al6060 3 pases de 100 repeticiones (figura 42), se estimó el valor de hasta 0.25 mm en la zona UFG, la capa deformada hasta el valor de 3.5 mm.

En el mapeo de la muestra Al5083 3 pases de 100 repeticiones (figura 46), se estimó el valor de hasta 0.125 mm en la zona UFG, la capa deformada hasta el valor de 2 mm.

Tanto en Al6060 y Al5083 los más altos valores de dureza se presentaron en 100 repeticiones, sin embargo se puede observar en los mapeos que la zona UFG de ambos es muy localizada.

3.6 Zona de alta deformación plástica

Como se mostró en la figura 30 la matriz de indentaciones no involucra la zona de alta deformación plástica como lo muestra la figura, en comparación con las pruebas de dureza anteriores la acumulación de la deformación es muy elevada debido al trabajo plástico, el cual favorece el refinamiento de grano, generado por una mayor cantidad de dislocaciones, resultando en un aumento de la dureza en esta zona, este incremento es de aproximadamente 100% en ambas aleaciones de aluminio.

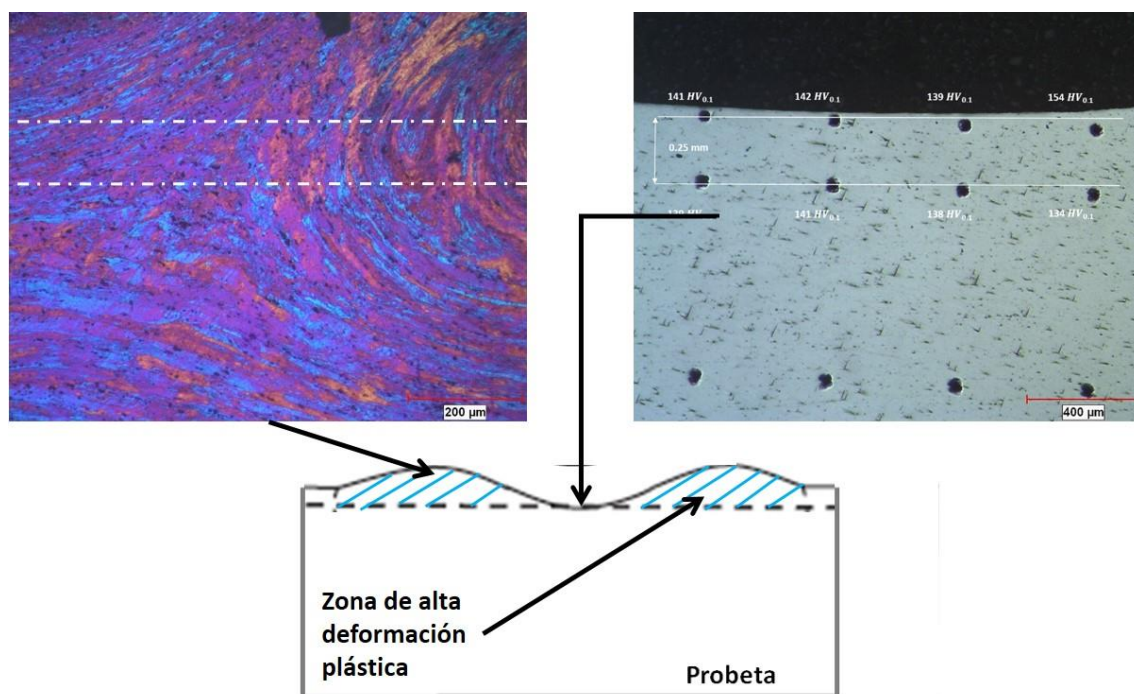


Figura 60 Zona de alta deformación plástica en probetas procesadas por hammering

3.7 Desgaste

En las siguientes imágenes se presentan las muestras después de las pruebas de desgaste en de las aleaciones Al6060 y Al5083 de referencia, en general, se observa diferente el tamaño de la huella siendo esta más marcada en el Al6060 comparado con el Al5083



Figura 61 Probeta Al6060-Referencia sometida a desgaste



Figura 62 Probeta Al5083-Referencia sometida a desgaste

El nivel de desgaste bajo condiciones no lubricadas presenta altas tasas de pérdida de masa y elevados coeficientes de fricción este mismo comportamiento ha sido reportado y los resultados experimentales demuestran un efecto negativo en el comportamiento de desgaste para materiales con tamaño de grano ultrafino en pruebas de pin on disc, aunque la dureza aumentó significativamente, las muestras de UFG presentan una mayor pérdida de masa, los mecanismos de desgaste dependen de cada sistema en particular, este comportamiento ha sido reportado en investigaciones anteriores. [55]

Los valores estimados de la pérdida de masa de las pruebas de desgaste en las probetas de referencia y las probetas 50, 70 y 100 repeticiones de ambas aleaciones se muestran en la figura 62. La condición de referencia presentó menor pérdida de masa comparada con las demás condiciones. Las partículas de alta dureza presentes en Al6060 al ser removidas por el proceso de desgaste afectan promoviendo una combinación de mecanismos de desgaste delaminación/adhesivo y acelerando la pérdida de masa. En el caso del Aluminio 5083, se observó una mayor resistencia al desgaste en comparación con el Aluminio 6060, sin embargo, al igual que este último, el refinamiento de la microestructura en la superficie, aceleró la pérdida de masa, en el caso del 5083 el mecanismo es básicamente desgaste por adhesión. En algunos casos este fenómeno es acelerado porque la deformación plástica severa causa una elevada densidad de defectos que reducen la capacidad de endurecimiento por deformación causando bandas de corte debajo de las superficies desgastadas acelerando el agrietamiento y de esta manera la pérdida de masa, este comportamiento ha sido observado en investigaciones anteriores en aluminio 5052, 5083 6061 [56-59]. Adicional a esto es posible la formación de óxido en la superficies de las aleaciones de aluminio, lo cual acelera de igual manera la pérdida de masa en estos sistemas, este comportamiento ha sido reportado y resultados experimentales demuestran una pérdida de masa con el incremento

de carga aplicada en una aleación de aluminio sometida a desgaste, las superficies se cubrieron con una capa de óxido y se concluyó que el proceso triboquímico que conduce a la formación de la capa de óxido juega un papel dominante en la resistencia al desgaste [60].

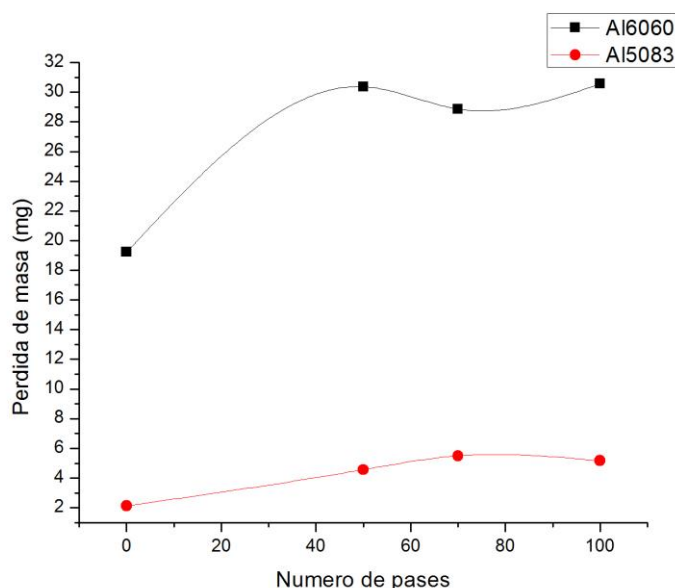


Figura 63 Pérdida de masa en desgaste por deslizamiento para muestras deformadas en diferentes números de pases por hammering.

El coeficiente de fricción bajo condiciones no lubricadas en Al6060 para 50, 70 y 100 repeticiones y la muestra de referencia se muestra en las figuras 63. Se observa que estos valores son más altos en las diferentes condiciones de procesamiento que los obtenidos en el Al6060 de referencia. Esto fue relacionado con el efecto combinado del refinamiento microestructural y las partículas de alta dureza desprendidas de la superficie durante el deslizamiento que generan un desgaste más abrasivo en comparación con el desgaste del material de referencia.

El coeficiente de fricción bajo condiciones no lubricadas en Al5083 para 50, 70 y 100 repeticiones y la muestra de referencia se presentan en la figura 64. Como se puede apreciar, el valor del coeficiente de fricción en el estado estacionario es en general menor que el del Aluminio 6060. Esto puede asociarse con la baja cantidad de partículas dispersas en el material al mayor refinamiento de grano pero también a su posible mayor estabilidad de la microestructura.

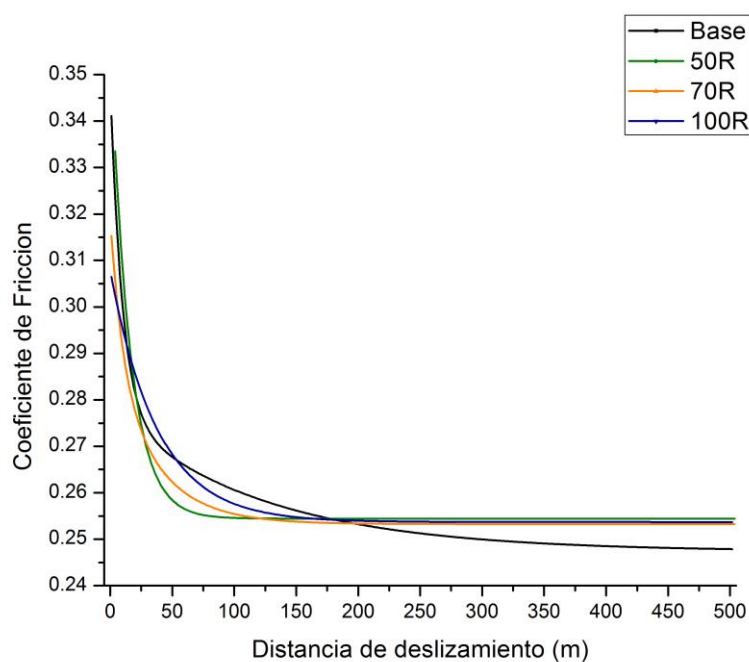


Figura 64 Coeficientes de fricción por hammering Al6060 todas las repeticiones y referencia sin procesamiento

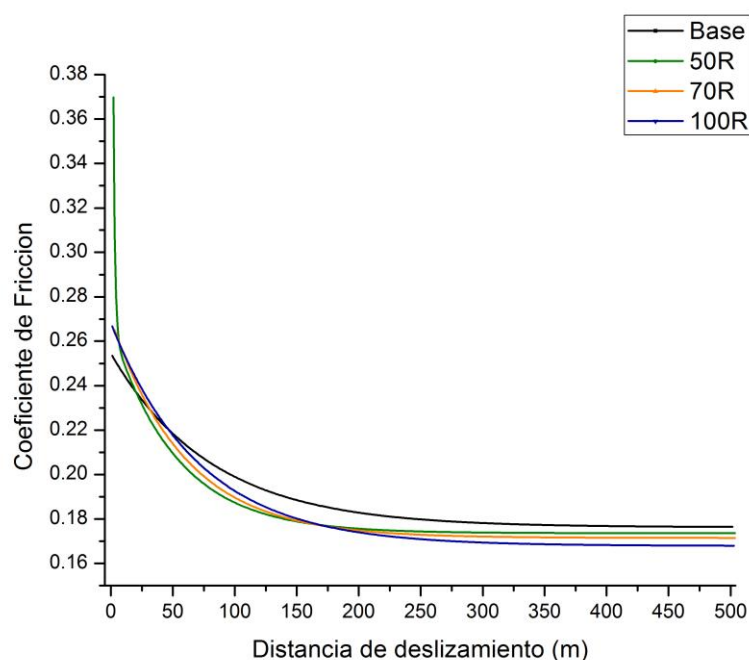


Figura 65 Coeficientes de fricción por hammering Al5083 todas las repeticiones y referencia sin procesamiento

Es razonable esperar que las aleaciones procesadas por hammering con mayor dureza deben tener un menor desgaste en comparación con sus contrapartes CG. Sin embargo, la investigación actual sobre el comportamiento de desgaste de los materiales procesados por el proceso de hammering ha sugerido en cambio que, aunque el tamaño de grano medio se ha reducido significativamente después del proceso, la dureza y la resistencia han mejorado significativamente, pero por el contrario la resistencia al desgaste no ha mejorado necesariamente. Esto sugiere que la correlación entre la dureza y el desgaste es limitada en este tipo de materiales.

Actualmente existe poca información disponible acerca de las propiedades tribológicas de estos materiales UFG. Es evidente (tabla 17) que no hay un efecto consistente de procesamiento en las propiedades de desgaste de materiales ya que en algunos reportes presentan un aumento en la resistencia al desgaste y en otros la resistencia al desgaste disminuye o no tiene ningún

efecto significativo. Estos resultados contradictorios, probablemente se asocian con cambios en el mecanismo de desgaste.

Con los resultados obtenidos por esta técnica y lo anteriormente estudiados (tabla 17) es posible determinar los diversos factores que influyen en el comportamiento de desgaste como se muestran en la tabla 21, La variabilidad en los resultados experimentales demuestran que se requieren más experimentos sistemáticos para alcanzar conclusiones definitivas sobre el efecto de procesamiento UFG en las propiedades de desgaste.

Tabla 21 Factores de influencia en la resistencia al desgaste de materiales UFG

Mejora en la resistencia al desgaste	Reducción en la resistencia al desgaste
Tamaño de grano muy pequeño	Disminuye la ductilidad
Microestructura refinada	Altas tasa de oxidación
Alta dureza	Capacidad de endurecimiento por deformación bajo
Alta resistencia	Límite de grano inestable
	Incompatibilidad de deformación entre la superficie y una región más profunda

3.8 Microscopía electrónica de barrido (SEM), análisis de desgaste

Examinación de las marcas de desgaste se analizaron utilizando microscopía electrónica de barrido (SEM), este estudio mostró que en las morfologías de las superficies desgastadas los mecanismos de desgaste fueron similares en cada aleación de aluminio.

3.8.1 Mecanismos de desgaste

Al6060, Al5083 de Referencia

Se puede observar, en primera instancia, el efecto de varios mecanismos de desgaste en ambas micrografías (figura 65 y 66), Se observa que en Al5083, figura 65, existen pequeñas zonas representativas de un desgaste adhesivo ligero (zona azul), lo que va en contraposición con la micrografía en Al6060, figura 66, donde se observa una zona claramente definida con la presencia de adhesión severa (zona azul).

La presencia de capas de material en Al6060, (zona naranja), denota la existencia de un mecanismo de delaminación, evidentemente más pronunciada que en Al5083.

Las características topográficas de las dos micrografías demuestran que por las características intrínsecas de cada aleación se observa mayor daño sobre una superficie Al6060 que sobre la Al5083.

En ambas superficies de desgaste se puede observar que la adhesión y delaminación, son los mecanismos predominantes de desgaste que están presentes en todas las condiciones, estos mecanismos han sido relacionados con materiales blandos y dúctiles, como cobre y aluminio [35, 61].

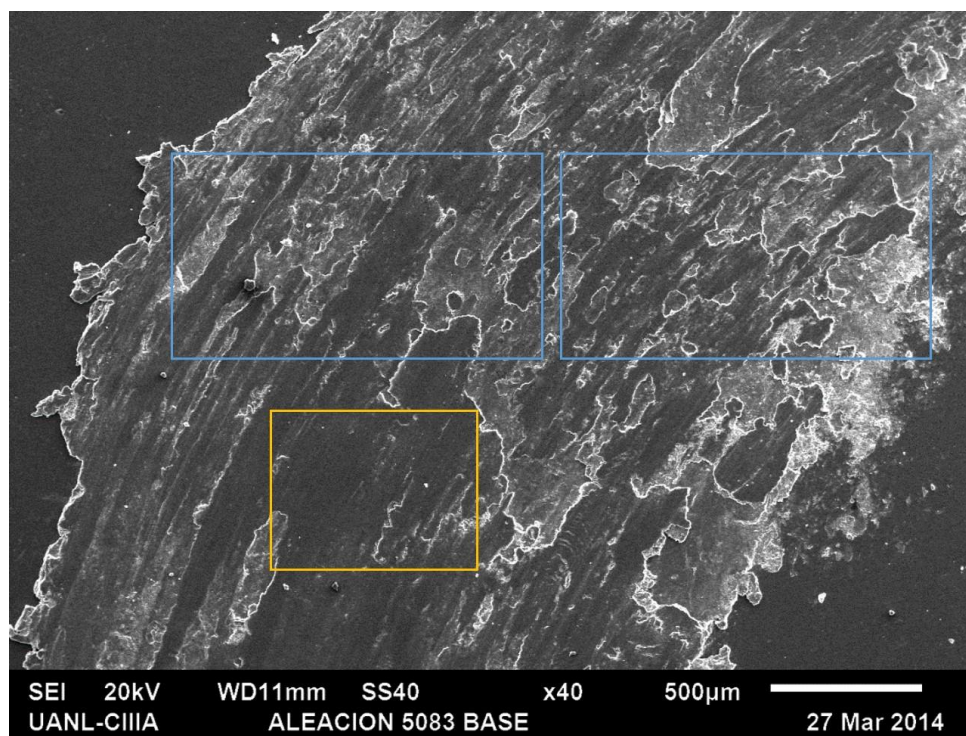


Figura 66 Detalle de la superficie de desgaste en Al5083 de referencia.

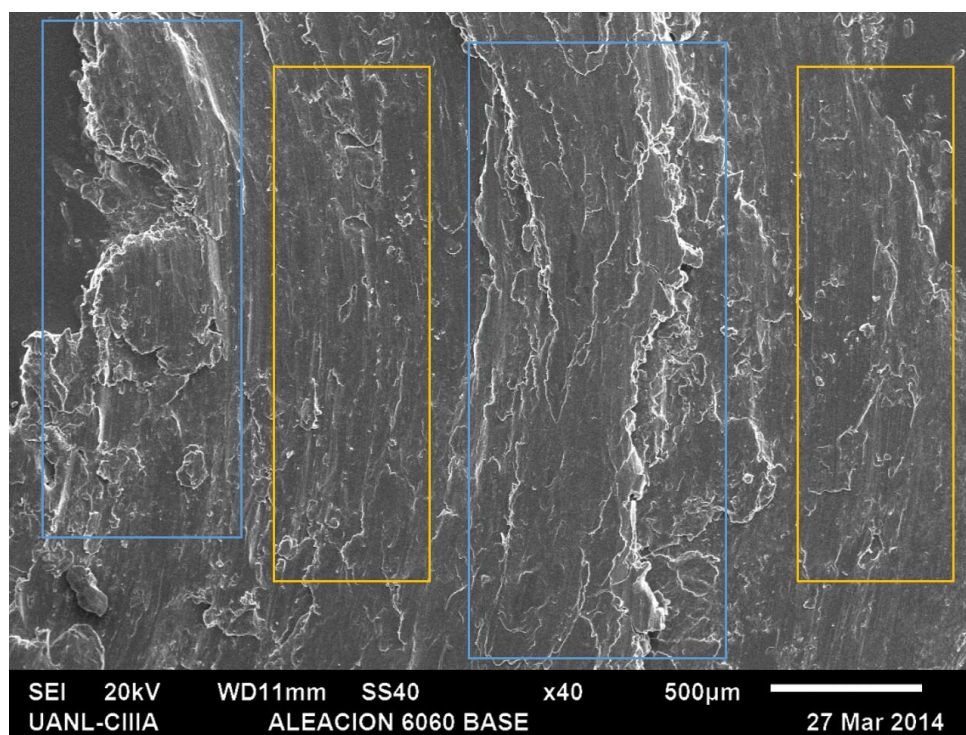


Figura 67 Detalle de la superficie de desgaste en Al6060 de referencia.

Al6060, Al5083 procesadas por hammering

Se observa que en microestructuras finas la alta densidad de límites de grano, que aunque promovió un daño por los mecanismos de desgaste anteriormente mencionados, la superficie presenta a un desgaste más uniforme y las zonas delaminadas son más pequeñas en el aluminio 5083, figura 68. La deformación plástica se observa en todas las condiciones de desgaste. Las pruebas de desgaste se realizaron sin lubricación el aumento de la temperatura durante las pruebas conducen a una posible recuperación y crecimiento de los grano [61]. Como resultado del incremento de la temperatura, las propiedades mecánicas disminuyen causando la deformación plástica, así como el desprendimiento de partículas.

Al realizar la comparación entre estas dos micrografías (figuras 67 y 68) se puede observar un acentuado proceso de adhesión (zona azul), sin embargo no es el único mecanismo presente, ya que la existencia de “capas” de material a lo largo de la micrografía (zonas naranjas) sugiere la existencia de un mecanismo por delaminación.

Además se debe observar la existencia de un rayado inicial (zonas negras) en cada una de las micrografías estudiadas, el cual se puede explicar como el efecto del deslizamiento entre las asperezas de la superficie aunado a los altos esfuerzos de contacto presentes en las pruebas.

En general, comparando las superficies de desgaste de los dos tipos de aluminio, figura 69 y 70, es posible observar una “huella” más pequeña en el 5083, lo cual evidentemente se vio reflejado en la pérdida de masa, ver figura 62.

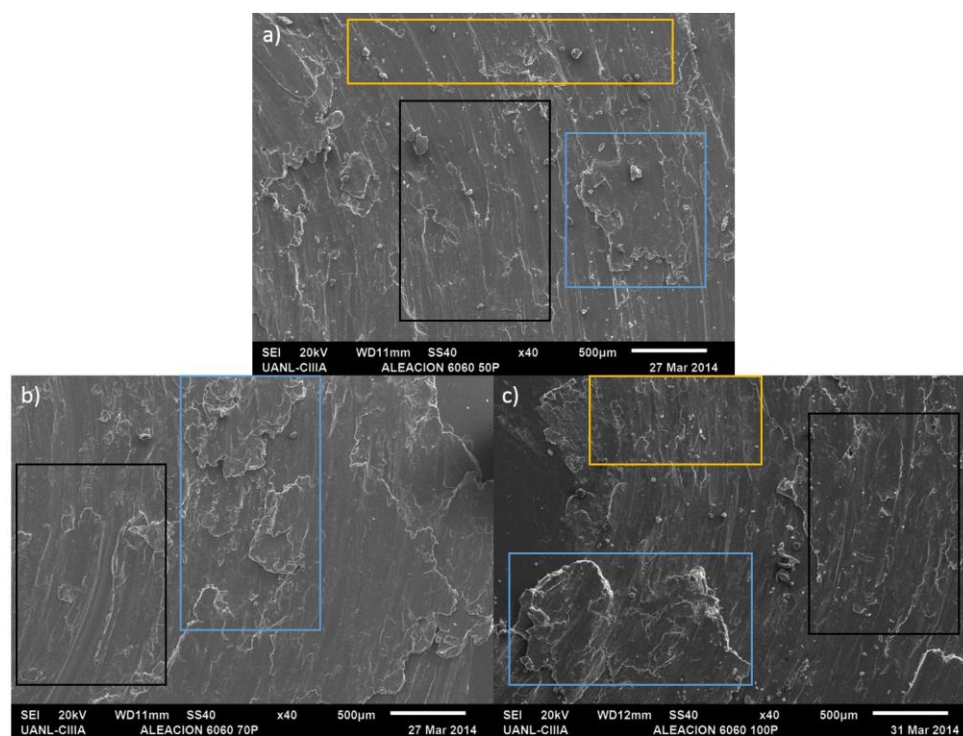


Figura 68 Detalle de las superficies de desgaste en Al6060: a) 50 Rep, b) 70 Rep, c) 100 Rep.

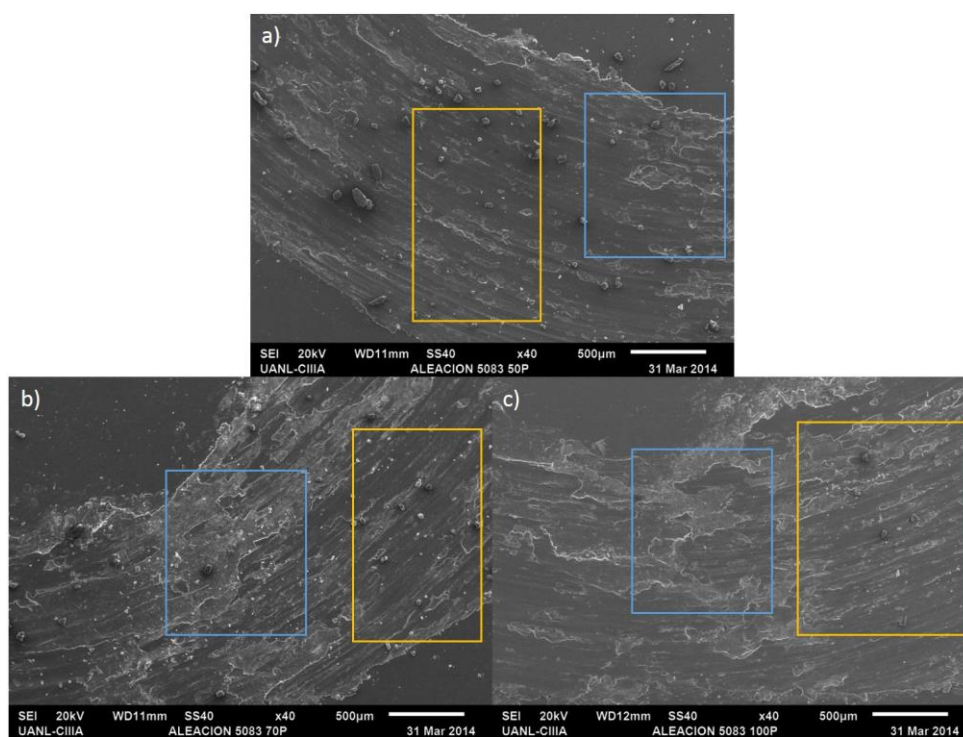


Figura 69 Detalle de las superficies de desgaste en Al5083: a) 50 Rep, b) 70 Rep, c) 100 Rep.

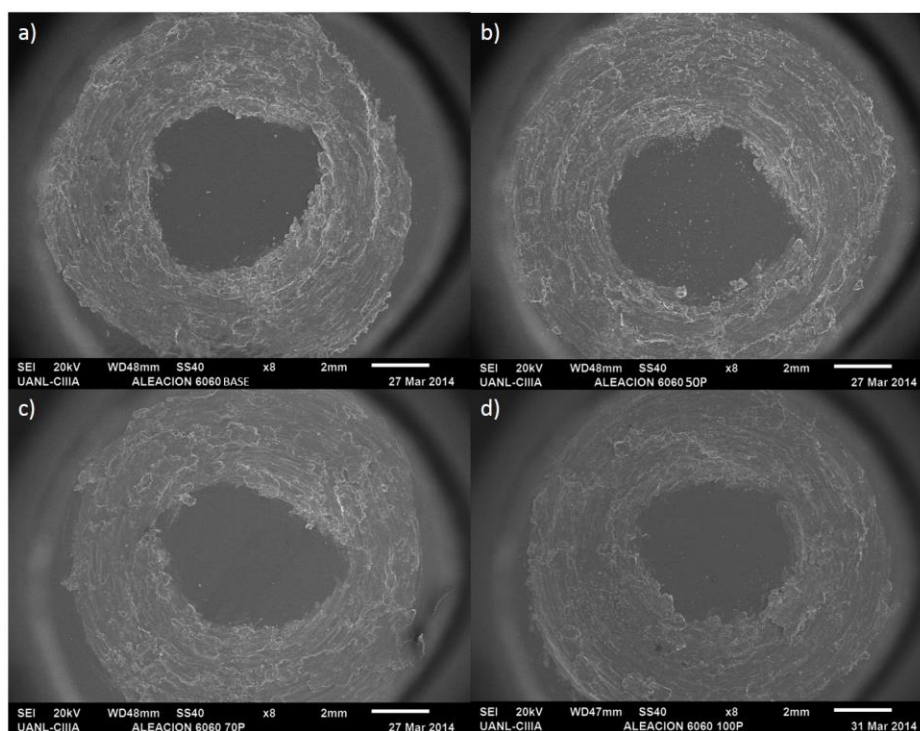


Figura 70 Superficies de desgaste en el aluminio Al6060: a) Referencia, b) 50 Rep, c) 70 Rep, d) 100 Rep.

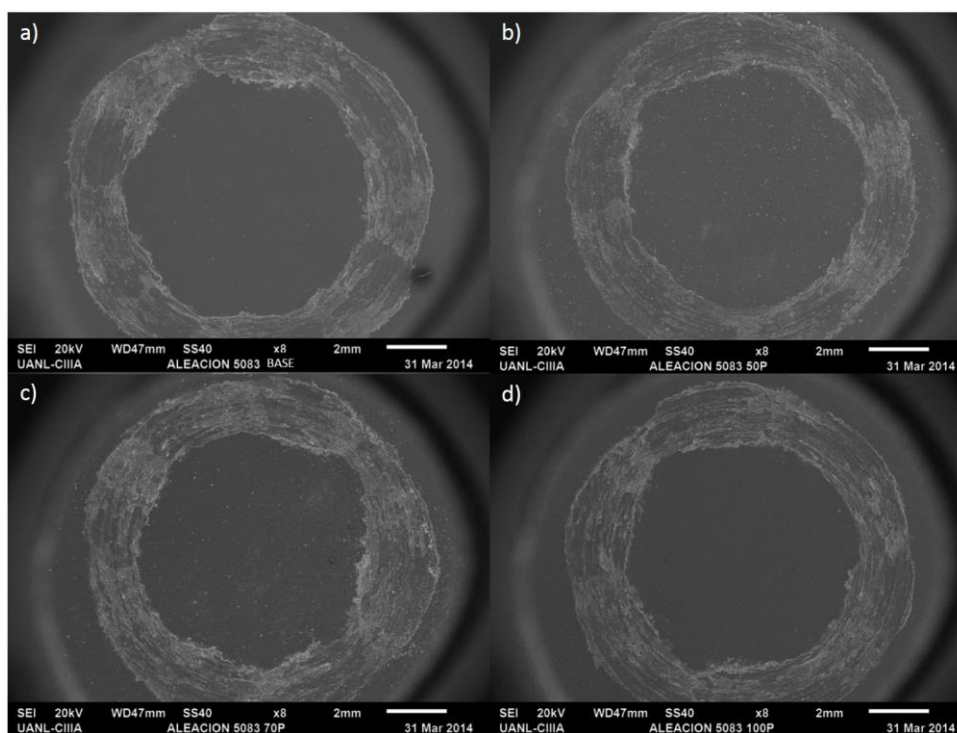


Figura 71 Superficies de desgaste en el aluminio Al5083: a) Referencia, b) 50 Rep, c) 70 Rep, d) 100 Rep.

CAPÍTULO IV

Conclusiones

Se ha desarrollado una técnica de tratamiento superficial por deformación plástica severa superficial para formar una capa con granos de tamaño ultrafino.

El proceso de “Hammering” proporciona un proceso eficaz para producir superficies con UFG sobre muestras de aleación de aluminio Al6060 y Al5083.

Comparado con otras técnicas, se puede lograr la producción de materiales UFG en la superficie de manera más sencilla con uso de equipos e instalaciones relativamente económicas.

Bajo la condición de procesamiento estudiadas, los mejores resultados obtenidos en Al6060, fueron a 100 repeticiones, por encima de estos se considera repeticiones críticas para el material debido a la alta deformación,

En el Al5083 no se identificó un número de pases crítico ya que las propiedades de endurecimiento por deformación permiten al Al5083 mejorar a través del número de repeticiones, en este caso, el que mejores resultados presento fue 100 repeticiones, al igual que el Al6060

El espesor de la capa UFG es de aproximadamente en Al6060; 0.25 mm y en Al5083; 0.125, ambos procesados bajo 3 pases 100 repeticiones, la dureza aumentó en la superficie, relacionado con la disminución en el tamaño de grano. El espesor de la capa deformada es de aproximadamente 4 mm para Al6060 y de 2 mm para Al5083.

La dureza de la capa deformada presenta un cambio de gradiente promedio creciente de 75 Hv en la matriz a 118 Hv en la superficie superior para Al6060

mejorando en un 72.18 % y para Al5083 de 113 Hv a 154 Hv mejorando un 40.29%.

La experimentación demuestra que la correlación entre la dureza y el desgaste es limitada debido a diversos factores que influyen en el comportamiento de desgaste.

El desgaste en seco en estos materiales no presento una mejora, esto fue causado por la estabilidad térmica de la microestructura bajo las condiciones de desgaste.

CAPÍTULO V

Recomendaciones

Realizar nuevas condiciones de procesamiento por hammering, seguir los lineamientos establecidos por esta investigación y buscar mejorarlos.

Mejorar las condiciones de funcionamiento del equipo, para el mejor control de variables como la cantidad de golpes, la velocidad del tornillo de banco.

Realizar tratamientos de envejecido a distintas temperaturas, buscando obtener los mejores resultados, la actividad precipitación juega un papel importante en la mejora de la ductilidad de las aleaciones de Al-Mg-Si.

Realizar más pruebas de desgaste por deslizamiento lubricadas bajo diferentes condiciones de carga, distancia de deslizamiento, buscando aclarar los mecanismos del comportamiento de desgaste de esta por esta técnica.

BIBLIOGRAFÍA

1. **LU K, L. J.** (1999). *Surface nanocrystallization (SNC) of metallic materials—presentation of the concept behind a new approach. Journal of Science and Technology*, 193-197.
2. **IWNHASHI Y, H. Z.** (1998). *The process of grain refinement in equal-channel angular pressing. Acta Materialia*, 3317-3331.
3. **WETSCHER F, V. A.** (2005). *Strain hardening during pressure torsion deformation. Materials Science and Engineering A*, 410-411.
4. **X.Y. Maoa, b. D.** (2010). *Application of a simple surface nanocrystallization process to a Cu–30Ni alloy. Elsevier, Wear*, 1224– 1230.
5. **Ruslan Z. Valiev, Y. E.** (2006). *Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation. JOM*, 33-39.
6. **Xiang-yang MAO1, D.-y. L.-z.-m.** (2012). *Surface nanocrystallization by mechanical punching process for. Science Direct*.
7. **Hashemi, William F. Smith & Javad.** *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. s.l. : The McGraw-Hill, 2006.
8. **Donald R. Askeland, Pradeep P. Fulay, Wendelin J. Wright.** *The Science and Engineering of Materials*. s.l. : International Thomson Publishing, 2010.
9. **Institute, A. N.** (1997). *Alloy and Temper Designation ANSI H35.1. American National Standards Institute*.
10. *Alloy and Temper Designation Systems for Aluminum. American National Standards Institute, ANSI H35.1-1997*. New York : s.n., 1997.
11. **George E. Totten, D. Scott Mackenzie.** *Handbook of Aluminum*. New York : Marcel Dekker, Inc., 2003.
12. **J. Randolph Kissell, Robert L. Ferry.** *Aluminum Structures*. s.l. : John Wiley & Sons, Inc., 2002.
13. **Association, European Aluminium.** *The Aluminum Automotive Manual*. 2002.
14. **International®, ASM.** *Lightweight Materials: Understanding the Basics*. s.l. : F.C. Campbell, 2012. pág. 38.
15. **Dieter, G. E.** (1988). *Mechanical Metallurgy, SI Metric Edition*. McGraw-Hill Book Company.

16. Kinetics of the β -AlFeSi to α -Al(FeMn)Si transformation in Al-Mg-Si alloys. **Kuijpers, Niels Cees Willen**. 2003.
17. **Extrusion, Non-Ferrous**. Non-Ferrous Extrusion. [En línea] www.nonferrous.com/website/extrusion-process/.
18. **Burakowski, Wierzchon**. Surface Engineering of Metals: Principles, Equipment, Technologies. 2000
19. **England, Gordon**. Surfaceengineer. [En línea] <http://www.surfaceengineer.co.uk/>.
20. Scripta Metallurgica. **R. Bohn, T. Haubopld, R. Birringer, H. Gleiter**. 811, 1991, Vol. 25.
21. Acta Materialia. **X. Wu, N. Tao, Y. Hong, B. Xu, J. Lu, K. Lu**. 2075, 2002, Vol. 50.
22. Surface and Coatings Technology. **A. Sahaya Grinspan, R. Gnanamoorthy**. 1768, s.l. : Journal, 2006, Vol. 201.
23. Surface Engineering. **S. Bagheri, M. Guagliano**. 3, 2009, Vol. 25.
24. Materials Science and Engineering A. **U. Martin, I. Altenberger, B. Scholtes, K. Kremmer, H. Oettel, Mater**. 69, 1998, Vol. 246.
25. Metallurgical and Materials Transactions A. **G.S. Was, R.M. Pelloux**. 656, 1979, Vol. 10.
26. —. **G.R. Leverant, et al**. 251, 1979, Vol. 10.
27. Surface Performance of Titanium Alloys. **L. Wagner, Jean K. Gregory, Henry J. Rack, Daniel Eylon**. 199, s.l. : Minerals, Metals & Materials Society, 1997.
28. Shot Peening. **L. Wagner, G. Lu"tjering, A. Niku Lari**. 453, s.l. : Pergamon Press, 1982.
29. Mechanical surface treatments on titanium, aluminum and magnesium alloys. **Wagner, L**. Cottbus, Germany : Elsevier, 1999.
30. **N. Arun Prakash, R. G.** (212). Surface nanocrystallization of aluminium alloy by controlled ball impact technique. Chennai, India: Elsevier, Science Direct.
31. **boschtools**. [boschtools.com](http://www.boschtools.com/Products/Tools). [En línea] <http://www.boschtools.com/Products/Tools>.
32. **Metals, aalco**. Datasheets Aluminium Alloy 6060 T5. [En línea] 2011. http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy_6060-T5~T595_144.ashx.
33. **McMaster-Carr**. McMaster-Carr Aluminum and Aluminum Alloys 5083 H116 (1/8 hard). [En línea] <http://www.mcmaster.com/>.

34. *Metallography and Microstructure of Aluminum and Alloys*. **Voort, George Vander**.
35. **T. Yasmin, A. K. (s.f.)**. Tribological (wear) properties of aluminum–silicon eutectic base alloy under dry sliding condition. *Process. Technol.*
36. **Kato K** (2002) *J Eng Tribol* 216:349
37. **N.J. Petch**, The cleavage strength of polycrystals, *Journal of Iron and Steel Institute* 174 (1953) 25–28.
38. **N. G.** (2012). Tribological properties of ultrafine-grained materials processed. *Springer Science*, 47:4779–4797.
39. **Eizadjou M, Manesh HD, Janghorban K** (2009) *J Alloy Compd* 474:406
49. **Talachi AK, Eizadjou M, Manesh HD, Janghorban K** (2011) *Mater Charact* 62:12
41. **Wang CT, Gao N, Wood RJK, Langdon TG** (2011) *J Mater Sci* 46:123.
42. **Wang CT, Gao N, Wood RJK, Langdon TG** (2011) *Mater Sci Forum* 667–669:1101
43. **Kim YS, Yu HS, Shin DH** (2009) *Int J Mater Res* 100:871
44. **Kim YS, Lee TO, Shin DH** (2004) *Mater Sci Forum* 449–452:625
45. **Kim YS, Ha JS, Shin DH** (2005) *Mater Sci Forum* 475–479:401
46. **Kim YS, Ha JS, Kim WJ** (2004) *Mater Sci Forum* 449–452:597
47. **Eizadjou M, Talachi AK, Manesh HD, Janghorban K** (2011) *Mater Sci Forum* 667–669:1107
48. **Kucukomeroglu T** (2010) *Mater Des* 31:782
49. **Ortiz-Cuellar E, Hernandez-Rodriguez MAL, Garcia-Sanchez E** (2011) *Wear* 271:1828
50. *A Little Analysis of Errors in Friction for Small Wear Tracks*. **Brandon A. Krick, W. Gregory Sawyer**. Florida, Gainesville : Springer Science, 2010.
51. *Metallography: Principles and Practice and ASM International*. **Voort, G.F. Vander**. s.l. : McGraw-Hill, 1999.
52. **International, ASM**. *Metallographic Techniques for Aluminum and Its Alloys. Handbook Metallography and Microstructure*. Vol. 9.
53. **Nikon**. (s.f.). *Inverted Microscope Epiphot-TME Manual*. En **Nikon**.

54. **N. G.** (2012). *Tribological properties of ultrafine-grained materials processed*. Springer, 47:4779–4797.
55. **Wang CT, Gao N, Wood RJK, Langdon TG** (2011) *J Mater Sci* 46:123.
56. **Kim YS, Ha JS, Kim WJ** (2004) *Mater Sci Forum* 449–452:597
57. **Kim YS, Lee TO, Shin DH** (2004) *Mater Sci Forum* 449–452:625
58. **Kim YS, Ha JS, Shin DH** (2005) *Mater Sci Forum* 475–479:401
59. **Eizadjou M, Talachi AK, Manesh HD, Janghorban K** (2011) *Mater Sci Forum* 667–669:1107
60. **Kucukomeroglu T** (2010) *Mater Des* 31:782
61. **B. Bhushan.** (1999). *Principles and Applications of Tribology*. John Wiley & Sons.
62. ASM. *Mechanical Testing and Evaluation*. s.l. : ASM INTERNATIONAL, 1998. Vol. 8.
63. **Hockauf, L. M.** (2009). *Silmultaneous Improvement of Strength and Ductility of Al-Mg-Si alloys by Conbining Equal Channel Angular Extrusion with Subsequent High-Temperature Short-Time Aging*. *Materials Science and Engineering* , 167-171.

ANEXOS

Anexo 1 muestra Al5083 golpe estacionario

Una probeta de Al5083 se sometió a un proceso de hammering estacionario, la punta golpeo la muestra en una sola posición durante 120 minutos, posteriormente se realizaron pruebas de microdureza en el área transversal bajo las mismas condiciones que las pruebas anteriores, los parámetros de procesamiento, registrados en los pases se exhiben en la tabla.

Tabla 22 Procesamiento Al5083 - Estacionario

Tipo	Tiempo (min)	# de Golpes
Estacionario	02:00:00	234374

La dureza fue de aproximadamente 164 Hv en la superficie superior, se redujo a un valor estable de 118 Hv después de la profundidad alcanzada de 0.5 milímetros.

El mapeo de la probeta procesada por hammering estacionario se muestra en la figura A-1.

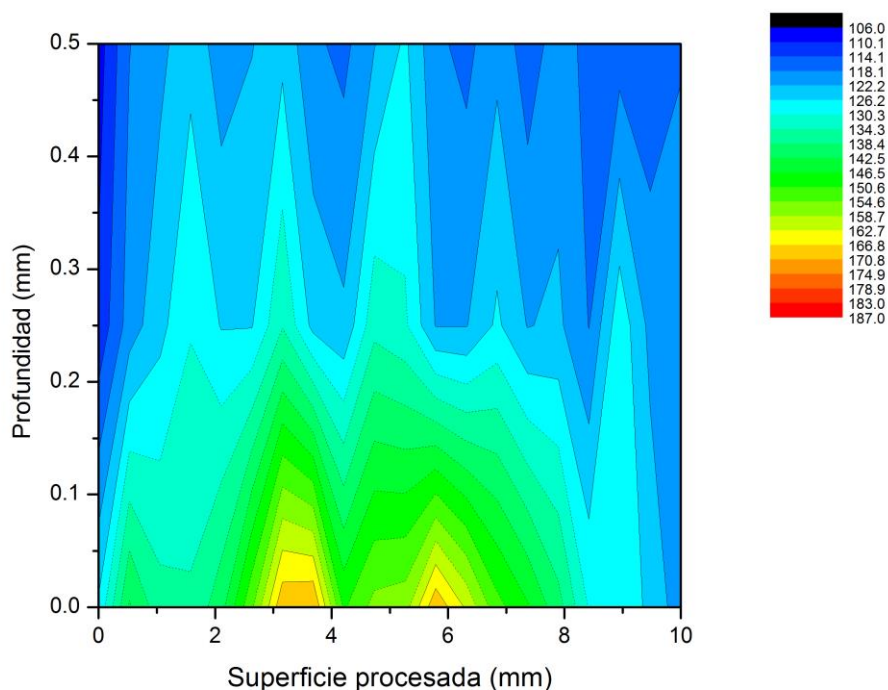


Figura A- 1 Mapeo aleación de aluminio 5083 procesado estacionario.

Anexo 2 muestra Al6060 envejecido

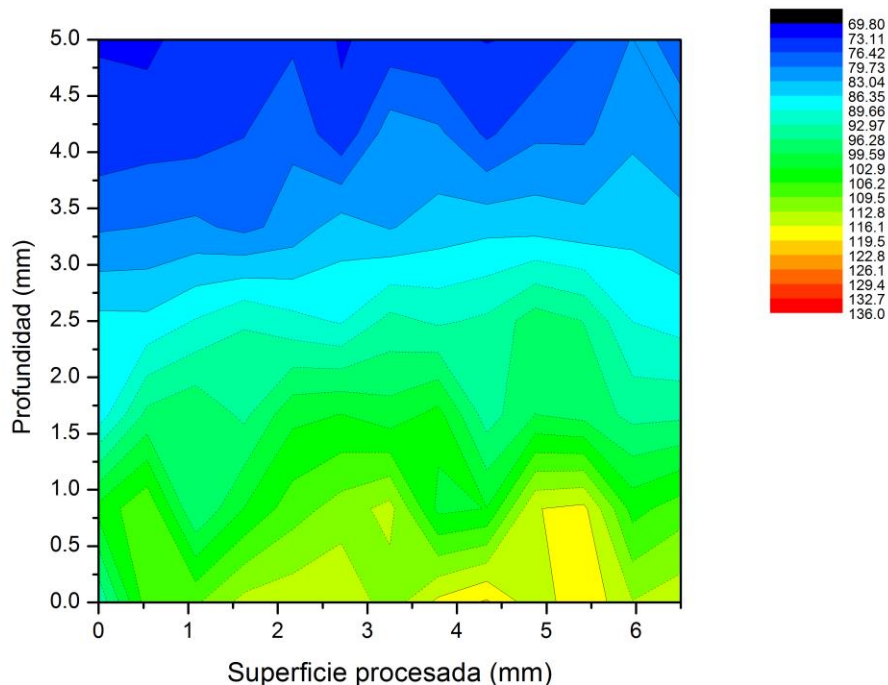
Una probeta procesada por hammering de Al6060 de 1 pase 100 repeticiones fue sometida a un tratamiento térmico de envejecido. La probeta se llevó a una temperatura de 170 °C, manteniendo la temperatura durante 20 min [63], se enfrió dentro del horno, posteriormente se realizaron pruebas de microdureza en el área transversal, bajo las mismas condiciones que las pruebas anteriores, los parámetros de procesamiento, registrados en los pases se exhiben en la tabla 23.

Tabla 23 Procesamiento Al6060 - Envejecido

Linea	Pases	Tiempo (min)	# de Golpes
Linea 1	100	25:45	38625

La dureza fue de aproximadamente 113 Hv en la superficie superior, se redujo a un valor estable de 74 Hv después de la profundidad alcanzada de 4 milímetros

El mapeo de la probeta procesada con 1 pase de 100 repeticiones envejecida se muestra en la figura A-2, en comparación con las probetas sin tratamiento térmico de envejecido los resultados de microdureza presentan una dureza muy similar, lo cual hace que se considere prácticamente la misma dureza, las propiedades mecánicas, se mantienen o varían muy poco en comparación con la figura 43.

**Figura A- 2 Mapeo aleación de aluminio 6060-T6 procesada 1 Pase - 100 Repeticiones – Envejecido.**

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Tanque Cuba electrolítica utilizada en la producción del aluminio.</i>	6
<i>Figura 2 Constitución de las aleaciones de aluminio [10]</i>	8
<i>Figura 3 Estructura de aluminio extruido, soportando paredes de vidrio [12].</i>	10
<i>Figura 4 Distintos dispositivos estructurales de aluminio: (a) Escalera, (b) Mosquetón, (c) Rin, (d) Artículo deportivo [12].</i>	10
<i>Figura 5 Aplicación marina de aleaciones de aluminio serie 5xxx.</i>	11
<i>Figura 6 Efecto del Mg en las propiedades tensiles de una aleación de aluminio comercial no tratable térmicamente [11].</i>	15
<i>Figura 7 Principio de endurecimiento por precipitación en aleaciones de aluminio [11].</i>	16
<i>Figura 8 Ruta de temperatura esquemática del calentamiento de aluminio durante la producción de perfiles extruidos [16].</i>	19
<i>Figura 9 Proceso de extruido de aleaciones de aluminio [17].</i>	19
<i>Figura 10 Ilustración esquemática del proceso de hammering [6]</i>	24
<i>Figura 12 Diagrama experimental global.</i>	25
<i>Figura 13 Roto-martillo montado en soporte vertical</i>	27
<i>Figura 14 Tornillo de banco en la parte inferior del roto-martillo.</i>	28
<i>Figura 15 Coples y flecha del eje “y”</i>	29
<i>Figura 16 Motor CD colocado en eje “y” y Tarjeta electrónica.</i>	29
<i>Figura 17 Punta de forma semiesférica para Hammering</i>	30
<i>Figura 20 Diagrama del proceso de hammering en 6xxx y 5xxx; a) 1 pase, b) y c) 3 pases.</i>	35
<i>Figura 21 Probeta aleación 6xxx antes del proceso de Hammering</i>	36
<i>Figura 22 Probeta aleación 5xxx antes del proceso de Hammering</i>	36
<i>Figura 23 Secuencia de procesamiento por hammering para ambas aleaciones</i>	38
<i>Figura 24 Probeta Al 6060 trabajada mediante la técnica hammering 1 Pase - 100 Repeticiones.</i>	39
<i>Figura 25 Probeta Al 6060 trabajada mediante la técnica hammering 3 Pases – 100 Repeticiones.</i>	40
<i>Figura 26 Probeta Al 5083 trabajada mediante la técnica hammering 5 Pases – 100 Repeticiones.</i>	41
<i>Figura 27 Probeta Al 5083 trabajada mediante la técnica hammering 3 Pases - 100 Repeticiones.</i>	42
<i>Figura 28 Corte Transversal de la probeta procesada por Hammering, montada en resina.</i>	44
<i>Figura 29 Microdurómetro Shimadzu.</i>	46
<i>Figura 31 Sección transversal probeta Al6060 indentada</i>	47
<i>Figura 32 Sección transversal probeta Al5083 indentada</i>	48
<i>Figura 33 Tribómetro pin-on-disk</i>	51
<i>Figura 34 Probeta Al5083 No-Procesada preparada para desgaste</i>	52
<i>Figura 36 Secuencia de procesamiento por desgaste para ambas aleaciones.</i>	54
<i>Figura 37 Celda electrolítica, reactivo Barker's</i>	56
<i>Figura 38 Dureza vs Superficie aleación de aluminio 6060-T6</i>	59
<i>Figura 39 Dureza vs Superficie aleación de aluminio 5083-H116.</i>	60
<i>Figura 40 Mapeo aleación de aluminio 6060-T6 procesada 3 Pases - 50 Repeticiones</i>	62
<i>Figura 41 Mapeo aleación de aluminio 6060-T6 procesada 3 Pases - 70 Repeticiones</i>	62
<i>Figura 42 Mapeo aleación de aluminio 6060-T6 procesada 3 Pases - 100 Repeticiones</i>	63

<i>Figura 43 Mapeo aleación de aluminio 6060-T6 procesada 1 Pase - 100 Repeticiones.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 44 Mapeo aleación de aluminio 5083 procesada 3 Pases - 50 Repeticiones</i>	<i>65</i>
<i>Figura 45 Mapeo aleación de aluminio 5083 procesada 3 Pases - 70 Repeticiones</i>	<i>66</i>
<i>Figura 46 Mapeo aleación de aluminio 5083 procesada 3 Pases - 100 Repeticiones</i>	<i>67</i>
<i>Figura 47 Mapeo aleación de aluminio 5083 procesada 5 Pases - 100 Repeticiones</i>	<i>68</i>
<i>Figura 48 Al5083 Dureza vs Tamaño de grano ($d^{-1/2}$) ($\mu\text{m}^{-1/2}$)</i>	<i>70</i>
<i>Figura 49 Al6060 Dureza vs Tamaño de grano ($d^{-1/2}$) ($\mu\text{m}^{-1/2}$)</i>	<i>70</i>
<i>Figura 51 Análisis de grano método de intersección</i>	<i>72</i>
<i>Figura 52 Micrografía Al5083 de referencia (microestructura original).</i>	<i>73</i>
<i>Figura 53 Perfil Al6060 50 Repeticiones Hammering</i>	<i>74</i>
<i>Figura 54 Perfil Al6060 70 Repeticiones Hammering</i>	<i>75</i>
<i>Figura 56 Perfil Al6060 100 Repeticiones Hammering</i>	<i>76</i>
<i>Figura 57 Perfil Al5083 50 Repeticiones Hammering</i>	<i>77</i>
<i>Figura 59 Perfil Al5083 100 Repeticiones Hammering</i>	<i>78</i>
<i>Figura 60 Zona de alta deformación plástica en probetas procesadas por hammering</i>	<i>79</i>
<i>Figura 61 Probeta Al6060-Referencia sometida a desgaste</i>	<i>80</i>
<i>Figura 62 Probeta Al5083-Referencia sometida a desgaste</i>	<i>80</i>
<i>Figura 66 Detalle de la superficie de desgaste en Al5083 de referencia.</i>	<i>87</i>
<i>Figura 68 Detalle de las superficies de desgaste en Al6060: a) 50 Rep, b) 70 Rep, c) 100 Rep.</i>	<i>89</i>
<i>Figura 71 Superficies de desgaste en el aluminio Al5083: a) Referencia, b) 50 Rep, c) 70 Rep, d) 100 Rep.</i>	<i>90</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Aleaciones trabajadas sistema de designación y características [11].</i>	9
<i>Tabla 2 Designaciones de tratamiento para aleaciones de aluminio [11].</i>	13
<i>Tabla 3 Designaciones de tratamiento para aleaciones de aluminio tratables térmicamente [11].</i>	13
<i>Tabla 4 Designaciones de tratamiento para aleaciones endurecidas por deformación [11].</i>	14
<i>Tabla 5 Propiedades tensiles de una placa de aluminio [11].</i>	18
<i>Tabla 6 Características de tratamientos de superficie mecánicos [29].</i>	23
<i>Tabla 7 Especificaciones técnicas del roto-martillo Bosch Bulldog Xtreme [31].</i>	26
<i>Tabla 8 Composición química nominal 6060 T6 [32].</i>	32
<i>Tabla 9 Composición química nominal 5083 H116 (1/8 hard) [33].</i>	32
<i>Tabla 10 Velocidades del tornillo de banco</i>	37
<i>Tabla 11 Procesamiento 1 Al6060</i>	39
<i>Tabla 12 Procesamiento 2 Al6060</i>	40
<i>Tabla 13 Procesamiento 1 Al5083</i>	41
<i>Tabla 14 Procesamiento 2 Al5083</i>	42
<i>Tabla 15 Indentaciones Al6060 (Largo y Ancho en mm)</i>	47
<i>Tabla 16 Indentaciones Al5083 (Largo y Ancho en mm)</i>	48
<i>Tabla 17 Propiedades de desgaste de aleaciones de aluminio procesadas por SPD [38].</i>	50
<i>Tabla 18 Dureza Vickers aleación de aluminio 6060-T6 (No procesada)*</i>	58
<i>Tabla 19 Dureza Vickers aleación de aluminio 5083-H116 (No procesada)*</i>	58
<i>Tabla 20 Incremento en porcentaje de dureza por proceso hammering vs material de referencia</i>	69
<i>Tabla 21 Factores de influencia en la resistencia al desgaste de materiales UFG</i>	85
<i>Tabla 22 Procesamiento Al5083 - Estacionario</i>	xii

ÍNDICE

A

Aluminio · 5

B

Barker's · 56

Bauxita · 6

C

Coeficiente de fricción · 82

Composición química · 32

D

Densidad · 5

Directamente vaciados · 7

Dispersión · 16

Desbaste y pulido · 44

Diseño · 26

E

Envejecido artificial · 17

Envejecido natural · 17

Evolución microestructural · 23

Extrusión · 18

Energía de falla de apilamiento · 22

F

Frecuencia de golpes · 37

G

Granos ultrafinos · 23

H

H-Tempers · 12

I

Ingeniería de superficies · 20

M

Mapeo de microdureza · 60

Microdureza · 45

Microestructura · 55

Micrografía · 71

N

No-Tratables Térmicamente · 12

P

Precipitación · 16

Procedimiento experimental · 25

Proceso Bayer · 6

Proceso de hammering · 23, 34, 35

Pruebas de desgaste · 50

Pruebas de desgaste · 80

Procesamiento 1 Al5083 · 41

Procesamiento 1 Al6060 · 39

Procesamiento 2 Al5083 · 42

Procesamiento 2 Al6060 · 40

S

Serie 5xxx · 7

Serie 6xxx · 7

Solución sólida · 15

T

Tratable-Térmicamente · 12

T-Tempers · 12

Trabajados · 7

Trabajo · 17